



Escuela de Caminos
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
UPC BARCELONATECH

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL EFECTO DE LA SATURACIÓN EN EL AMORTIGUAMIENTO DINÁMICO DE SUELOS COMPACTADOS

Trabajo realizado por:

Ane Canseco Murua

Dirigido por:

Antonio Lloret

Alberto Ledesma

Máster en:

Ingeniería del Terreno

Barcelona, junio 2019

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

RESUMEN

En este Trabajo Fin de Máster se ha realizado el estudio experimental del efecto de la saturación en el amortiguamiento dinámico de suelos compactados, mediante el equipo de laboratorio columna resonante. El suelo ensayado es la arcilla limosa del llano de Barcelona.

El objetivo de dicho trabajo, ha sido realizar ensayos con muestras que puedan acercarse a los extremos del grado de saturación, Sr. Para ello, en primer lugar, se han analizado una serie de trabajos realizados previamente, para poder apoyarse en los datos ya conocidos para la adecuada realización de la investigación.

Se ha detallado el material utilizado, se ha medido su granulometría y su humedad natural, para poder saber la proporción de peso de suelo seco necesario para cada muestra y en consecuencia la proporción de agua que a las muestras se le deberá de añadir, para realizar los ensayos en las condiciones deseadas.

A continuación, se ha explicado la metodología tanto analítica como experimental que se ha utilizado para la completa realización de dicho trabajo. En él, puede verse el marco teórico utilizado para poder comparar los resultados experimentales obtenidos en laboratorio con los analíticos, junto a los detalles del funcionamiento de la columna resonante, las partes que esta tiene y cómo se han podido obtener los datos necesarios para el análisis. Se ha hablado también del equipo triaxial, ya que este ha sido necesario para la saturación completa de las muestras. Para el análisis del amortiguamiento del terreno, se han tenido en cuenta el módulo de corte, G , y el factor de amortiguamiento, D , respecto a la deformación de corte γ , que en la columna resonante oscila entre los valores de 10^{-5} y 10^{-1} .

Se ha detallado también, el proceso de fabricación de las muestras y las características de estas. Las muestras ensayadas, tienen una densidad seca de $1,63 \text{ Mg/m}^3$ y grados de saturación de 20,7%, 41,4%, 62,0%, 82, 7% y 100%.

Una vez habiendo explicado todo el proceso de inicio a fin del ensayo mediante la columna resonante, se ha detallado la toma de datos y los resultados obtenidos mediante estos. Los resultados obtenidos, se han ido comparando paralelamente con los resultados obtenidos en otro estudio realizado en el equipo triaxial para muestras en las mismas condiciones (Navarro, 2019).

Al realizar el estudio completo, se ha podido ver que, el factor de amortiguamiento D aumenta, cuando el grado de saturación aumenta, para un mismo rango de deformación de corte. En cambio, el módulo de corte tiene una tendencia ascendente cuando el grado de saturación es menor.

Para finalizar, cabe subrayar que los valores comparados con los obtenidos en el equipo triaxial son coherentes. Sin embargo, se ha observado una anomalía en la muestra completamente saturada, debido probablemente a su dificultad de ensayo.

ABSTRACT

The subject of this master's thesis is the effect of the saturation on the variability of the damping ratio of the compacted soils. Experimental tests have been developed with the resonant column in order to study the behaviour of the silty clay of Barcelona city.

The main purpose of this work is the study of laboratory specimens with very low or very high values for saturation degree. In order to achieve this, previous articles have been studied to gain the data needed for the organization of this research.

The material has been deeply analysed, measuring the granulometry and natural humidity. With this data the amount of dry soils needed for each specimen has been calculated. Consequently, the water proportion to be added to obtain the desired conditions has been measured.

Then, the analytical and experimental methodology used in this thesis has been explained. The fundamental theory needed to compare the analytical results with the experiments and detailed information about how the resonant column works, how it is made and how the results have been obtained are presented in the same chapter.

The procedure of saturation of the specimens using the triaxial equipment has been provided, and a description of its functioning is presented. For the analysis of the damping ratio, D , it has been taken into account the shear modulus, G , and the shear deformation, γ , (values between 10^{-5} y 10^{-1} for the resonant column).

A detailed description of specimens has been provided. The specimens have a dry density of $1,63 \text{ Mg/m}^3$ and saturation ratio of 20,7%, 41,4%, 62,0%, 82, 8% and 100%.

At this point a description from the beginning until the end of the test in the resonant column is presented. A complete scheme of the data obtained is provided. For the specimen with similar configuration, comparisons between results obtained with resonant column and triaxial equipment has been developed (Navarro, 2019). Being the saturated specimen ($S_r=1$) the most complex test to developed, the analyses of the results obtained for this particular experiments is particularly challenging.

After the completion these studies, it has been shown that the damping ratio increases with the saturation ratio for the same rank of shear deformation γ . On the other hand, the shear modulus G decreases when the saturation is smaller.

It is to underline that, the values compared with the triaxial equipment are coherent, but some anomalies are present for the totally saturated specimen, due to the experimental difficulties.

ÍNDICE

RESUMEN	2
ABSTRACT	3
LISTA DE IMÁGENES	6
LISTA DE TABLAS	9
1. INTRODUCCIÓN	13
2. OBJETIVO Y METODOLOGIA	15
2.1. OBJETIVO	15
2.2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	15
3. ANTECEDENTES Y TRABAJOS PREVIOS	18
3.1. ANTECEDENTES	18
3.2. TRABAJOS REALIZADOS PREVIAMENTE	19
4. EQUIPO UTILIZADO EN LABORATORIO	23
4.1. COLUMNA RESONANTE	23
4.2. PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO	26
4.2.1. OBTENCIÓN DEL MÓDULO DE CORTE G	27
4.2.2. OBTENCIÓN DEL FACTOR DE AMORTIGUAMIENTO D	28
4.2.3. OBTENCIÓN DE LA PERMEABILIDAD DEL SUELO	31
5. MATERIAL Y METODOLOGÍA UTILIZADA	33
5.1. MATERIAL UTILIZADO	33
5.2. METODOLOGÍA DE ENSAYO	40
5.2.1. PREPARACIÓN DE MATERIAL	40
5.2.2. PREPARACIÓN DE LA PROBETA	44
5.2.3. MONTAJE LA PROBETA EN LA COLUMNA RESONANTE	47
5.2.4. SATURACIÓN DE LA PROBETA EN EL EQUIPO TRIAXIAL	54
6. ENSAYO DE LA PROBETA EN EL EQUIPO DE COLUMNA RESONANTE	60
7. CRONOGRAMA DE TRABAJOS DE LABORATORIO	64

8.	RESULTADOS	65
8.1.	HUMEDADES DE LAS PROBETAS	65
8.2.	PERMEABILIDAD EN LA MUESTRA SATURADA	65
8.3.	RESULTADOS QUE SE OBTIENEN EN LA COLUMNA RESONANTE PARA TODAS LAS MUESTRAS	67
9.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	76
9.1.	EFFECTO DE LA DEFORMACIÓN LA SATURACIÓN EN LA RIGIDEZ A CORTE	76
9.2.	EFFECTO DE LA SATURACIÓN EN LOS PARAMETROS DE RIGIDEZ G_0 Y $\gamma_{0.7}$	78
9.3.	EFFECTO DE LA DEFORMACIÓN Y DE LA SATURACIÓN EN EL FACTOR DE AMORTIGUAMIENTO	82
9.4.	EFFECTO DE LA SATURACIÓN EN LOS PARAMETROS DE AMORTIGUAMIENTO D_0 Y D_{max}	86
9.5.	RELACIÓN ENTRE EL MÓDULO DE CORTE Y EL FACTOR DE AMORTIGUAMIENTO	87
10.	COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON EL EQUIPO TRIAXIAL	89
10.1.	MUESTRA 1. GRADO DE SATURACIÓN DEL 62%	89
10.2.	MUESTRA 2. GRADO DE SATURACIÓN DEL 41%	91
10.3.	MUESTRA 3. GRADO DE SATURACIÓN DEL 83%	92
10.4.	MUESTRA 4. GRADO DE SATURACIÓN DEL 100%	94
10.5.	MUESTRA 5. GRADO DE SATURACIÓN DEL 21%	95
11.	COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON J. POUCELL	97
12.	CONCLUSIONES	102
13.	FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN	104
14.	REFERENCIAS	105
	ANEXO A: PLANTILLA UTILIZADA PARA TOMA DE DATOS EN LABORATORIO	108
	ANEXO B: MUESTRA 1, HUMEDAD 15%	109
	ANEXO C: MUESTRA 2, HUMEDAD 10%	121
	ANEXO D: MUESTRA 3, HUMEDAD 20%	133
	ANEXO E: MUESTRA 4, HUMEDAD 24,2%	146
	ANEXO F: MUESTRA 5, HUMEDAD 5%	158

LISTA DE IMÁGENES

Imagen 1: Curva módulo de corte G vs deformación de corte – Atkinson & Salfords (1991).	24
Imagen 2: Ensayo de columna resonante, vibración torsional del espécimen sólido.	24
Imagen 3: Descripción gráfica de las bobinas y los imanes y sus movimientos en el cabezal de la columna resonante, sin tocarse entre ellas.	25
Imagen 4: Esquema de la columna resonante, Suriol (1993).	25
Imagen 5: Esquema de la probeta y el cabezal en la columna resonante; Castante, Chung & Vanderkooy (2003).	26
Imagen 6: Ángulo de rotación de la muestra.	27
Imagen 7: Variación el módulo de corte G normalizado respecto a la deformación de corte normalizada en $\gamma_{0,7}$, Santos & Correja (2001).	28
Imagen 8: Suelo natural y los martillos de goma utilizados para no romper las partículas de este.	33
Imagen 9: Suelo natural a la izquierda y suelo de muestra de laboratorio a la derecha peso de suelo + recipiente.	34
Imagen 10: Suelo natural separado por distintos tamaños, por cada tamiz.	34
Imagen 11: Muestra cilíndrica con y sus medidas.	39
Imagen 12: Peso de suelo de 142,46g antes de añadirle el agua deseada.	42
Imagen 13: Procedimiento para añadir el agua poco a poco con ayuda de un pulverizador.	42
Imagen 14: Suelo mezclado con el agua necesaria para una humedad concreta.	43
Imagen 15: Tamiz número 10 con suelo ya húmedo, para evitar grumos al añadir agua.	43
Imagen 16: Suelo húmedo y cerrado para que la humedad sea uniforme en toda la muestra.	44
Imagen 17: Piezas utilizadas para el montaje y compactación de las muestras en laboratorio.	44
Imagen 18: Montaje del molde cilíndrico.	45

Imagen 19: Tacos y cabezal para compactación.....	45
Imagen 20: Procedimiento empleado para colocar el suelo dentro del molde cilíndrico.....	46
Imagen 21: Pieza cilíndrica que ayuda a poder sacar la muestra más fácilmente sin romperla.....	46
Imagen 22: Pasos a seguir para poder sacar la muestra con facilidad.	47
Imagen 23: Muestra preparada y envuelta para que no pierda la humedad.....	47
Imagen 24: Base y cabezal de la columna resonante, con sus respectivas piedras porosas.....	48
Imagen 25: Instrumento y colocación de las membranas de látex.	49
Imagen 26: Tóricas y su colocación.....	49
Imagen 27: Pieza metálica de la columna resonante que rodea la muestra.....	50
Imagen 28: Cabezal de la columna resonante y los tornillos que este tiene para distintos usos.	51
Imagen 29: Imán y bobina colocados para que no se toquen entre ellos.....	51
Imagen 30: Procedimiento para unir la pieza anillo flotante al cabezal que se ha colocado a la columna resonante, mediante tornillos.	52
Imagen 31: Cables y puertos que tiene la columna resonante para poder conectar los equipos necesarios para las mediciones.	52
Imagen 32: Equipos a los que se conecta la columna resonante.	53
Imagen 33: Tapa cerrada mediante tornillos bien ajustados, para poder aplicar el aire comprimido.	53
Imagen 34: Válvulas que controlan el paso del aire comprimido.....	54
Imagen 35: Base del equipo triaxial en laboratorio.....	55
Imagen 36: Controladores (Presión de cámara y presión de cola) y caja del equipo triaxial.....	55
Imagen 37: Imagen representativa que muestra que del cabezal y de la base no sale aire (burbujas).....	56
Imagen 38: Colocación de las membranas de látex en el equipo triaxial.....	56

Imagen 39: Pieza utilizada para poder colocar las tóricas en el equipo triaxial.	57
Imagen 40: Muestra colocada en la base del equipo triaxial.	57
Imagen 41: Equipo triaxial con la cámara montada y cerrada.	58
Imagen 42: Tapón que se debe destapar en el equipo triaxial para referenciar el valor de presión 0 kPa. ...	58
Imagen 43: Equipos que se conectan a la columna resonante para poder realizar el ensayo.....	60
Imagen 44: Ondas sinusoidales, en azul la onda de excitación y en amarillo la onda de respuesta.....	61
Imagen 45: Situación de resonancia, ejes del elipse perfectamente alineados con los ejes X, Y.	61
Imagen 46: Imagen congelada para toma de mediciones mediante cursores de los valores Vpp y fr.	62
Imagen 47: Onda de respuesta en el momento en el que se para la excitación cíclica.	63
Imagen 48: Definición gráfica de la muestra y las presiones que esta tiene.....	66
Imagen 49: Valor A_0 , cresta más alta de la onda al dejar de excitar la muestra.	69

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Granulometría correspondiente al suelo de las muestras de laboratorio.....	35
Tabla 2: Granulometría correspondiente al suelo natural almacenado en el laboratorio.....	36
Tabla 3: Corrección de granulometría del suelo natural, basándose en los valores del suelo de las muestras.	37
Tabla 4: Datos de la arcilla limosa del llano de Barcelona, con el resultado de la humedad natural de 1,398%.	39
Tabla 5: Medidas de las muestras cilíndricas que se realizan para los ensayos.....	39
Tabla 6: Parámetros del suelo arcilla limosa de Barcelona.	41
Tabla 7: Valores de peso del suelo y de agua necesarios para cada porcentaje de humedad y grado de saturación.	41
Tabla 8: Calculo de humedades reales de las muestras ensayadas, teniendo en cuenta peso húmedo y peso seco.....	65
Tabla 9: Características de la muestra 1 (humedad 15%).....	67
Tabla 10: Resultados obtenidos por J. Poucell, en el estudio realizado en el año 2016.	97

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Curva de histéresis, deformación de corte respecto a la tensión de corte. Definición de los módulos de corte (Hardin & Drnevich, 1972).	30
Gráfico 2: Variación de la curva de módulo de corte normalizada y el factor de amortiguamiento respecto a la deformación de corte (Ishihara, 1996).	31
Gráfico 3: Curva granulométrica de suelo de muestras anteriores de laboratorio.....	35
Gráfico 4: Curva granulométrica de suelo del suelo natural almacenado en laboratorio.....	36
Gráfico 5: Curvas granulométricas ajustadas (suelo natural y suelo de muestras).....	38
Gráfico 6: Volumen respecto al tiempo durante la saturación de la muestra (con humedad inicial del 15%).	66
Gráfico 7: Amplitudes descendientes vs Número de ciclos, al dejar de excitar la muestra número 1, con humedad 15%.	68
Gráfico 8: Módulo de corte G vs deformación de corte γ , con los valores medidos en laboratorio (puntos azules) y el correspondiente ajuste (en rojo), para la muestra con humedad 15%.	71
Gráfico 9: Factor de amortiguamiento D vs deformación de corte γ , puntos medidos en laboratorio y el ajuste correspondiente a Poucell (2016).	72
Gráfico 10: Factor de amortiguamiento D vs deformación de corte γ , puntos medidos en laboratorio y el ajuste correspondiente al ratio de amortiguamiento del material (Assimaki, Kaurel, Whittle, 2000).	73
Gráfico 11: Tensión de corte τ vs deformación de corte γ , obtenido mediante el ajuste de ratio de amortiguamiento del material (Assimaki, Kaurel, Whittle, 2000)	74
Gráfico 12: Factor de amortiguamiento D vs deformación de corte γ , puntos medidos en laboratorio y el ajuste correspondiente al amortiguamiento histerético en modelos de pequeñas deformaciones (Brinkgreve, Kappert, Bonnier, 2007).	75
Gráfico 13: Módulo de corte G respecto a la deformación de corte γ de las 5 muestras.....	76
Gráfico 14: Módulo de corte normalizado G/G_0 respecto a deformación de corte γ	77

Gráfico 15: Modulo de corte G respecto al grado de saturación S_r , teniendo valores fijos de deformación de corte γ	78
Gráfico 16: Variación del módulo de corte inicial G_0 respecto a la humedad del suelo.....	79
Gráfico 17: Variación del módulo de corte inicial G_0 respecto al grado de saturación del suelo.....	80
Gráfico 18: Variación de la deformación de referencia $\gamma_{0,7}$ respecto al grado de saturación del suelo.	81
Gráfico 19: Factor de amortiguamiento respecto a la deformación de corte de cada muestra.	82
Gráfico 20: Factor de amortiguamiento respecto a la deformación de corte de cada muestra, representada en escala logarítmica.	83
Gráfico 21: Factor de amortiguamiento D vs grado de saturación S_r en función de la deformación de corte γ , modelo de Poucel (2016).	84
Gráfico 22: Factor de amortiguamiento D vs grado de saturación en función de la deformación de corte γ , modelo de Ratio de amortiguamiento del material (Assimaki, Kaurel, Whittle, 2000).....	85
Gráfico 23: Factor de amortiguamiento D vs grado de saturación S_r en función de la deformación de corte γ , modelo de amortiguamiento histerético en modelos de pequeña tensión de rigidez (Brinkgreve, Kappert, Bonnier, 2007)	86
Gráfico 24: Variación de factor de amortiguamiento D respecto al grado de saturación S_r	87
Gráfico 25: Factor de amortiguamiento D respecto a módulo de corte normalizado G/G_0	88
Gráfico 26: Comparación de los resultados entre la columna resonante y el equipo triaxial, módulo de corte G respecto a deformación de corte γ , muestra con humedad 15%.	90
Gráfico 27: Comparación de los resultados entre la columna resonante y el equipo triaxial, factor de amortiguamiento D respecto a deformación de corte γ , muestra con humedad 15%.	90
Gráfico 28: Comparación de los resultados entre la columna resonante y el equipo triaxial, módulo de corte G respecto a deformación de corte γ , muestra con humedad 10%.	91
Gráfico 29: Comparación de los resultados entre la columna resonante y el equipo triaxial, factor de amortiguamiento D respecto a deformación de corte γ , muestra con humedad 10%.	92

Gráfico 30: Comparación de los resultados entre la columna resonante y el equipo triaxial, módulo de corte G respecto a deformación de corte γ , muestra con humedad 20%.	93
Gráfico 31: Comparación de los resultados entre la columna resonante y el equipo triaxial, factor de amortiguamiento D respecto a deformación de corte γ , muestra con humedad 20%.	93
Gráfico 32: Comparación de los resultados entre la columna resonante y el equipo triaxial, módulo de corte G respecto a deformación de corte γ , muestra saturada.	94
Gráfico 33: Comparación de los resultados entre la columna resonante y el equipo triaxial, factor de amortiguamiento D respecto a deformación de corte γ , muestra saturada.	95
Gráfico 34: Comparación de los resultados entre la columna resonante y el equipo triaxial, módulo de corte G respecto a deformación de corte γ , muestra con humedad 5%.	96
Gráfico 35: Comparación de los resultados entre la columna resonante y el equipo triaxial, factor de amortiguamiento D respecto a deformación de corte γ , muestra con humedad 5%.	96
Gráfico 36: Comparación de resultados con Poucell (2016), módulo de corte inicial respecto al grado de saturación S_r .	98
Gráfico 37: Comparación de resultados con J. Poucell, módulo de corte inicial partido módulo de corte inicial promedio respecto al grado de saturación S_r .	99
Gráfico 38: Comparación de resultados con J. Poucell, factor de amortiguamiento D respecto al grado de saturación S_r , para una deformación de corte constante, correspondiente a 10^{-3} .	100
Gráfico 39: Comparación de resultados con J. Poucell, factor de amortiguamiento D respecto al grado de saturación S_r , para una deformación de corte constante, correspondiente a 10^{-5} .	101

1. INTRODUCCIÓN

El estudio del efecto de la saturación en suelos compactados es interesante, ya que en la Ingeniería Civil es de suma importancia conocer el comportamiento dinámico que puede tener el suelo y en consecuencia, en las posibles estructuras que se apoyen en ella. Este comportamiento dinámico puede darse en consecuencia de explosivos, sismos, compactación, la carga de vehículos y la cimentación de maquinarias. Es importante tener en cuenta el estado de resonancia, fenómeno que corresponde al momento en el que la fase de la onda de excitación y la de la respuesta del sistema coinciden. Este estado puede llegar a crear grandes deformaciones aún teniendo bajas intensidades.

Se han realizado pruebas completas con el equipo de columna resonante, en muestras compactadas de arena limosa del llano de Barcelona, con una granulometría mal graduada. Estas pruebas se han realizado para evaluar la influencia del grado de saturación en las propiedades de rigidez a pequeñas deformaciones del suelo, en muestras parcialmente saturadas o totalmente saturadas.

Las muestras saturadas, se han creado con una humedad concreta (del 15% en el caso de este estudio) y se han saturado con ayuda del equipo triaxial, haciendo que el agua pase a la muestra durante 24 horas y utilizando además este sistema para poder calcular la permeabilidad (K) de la arcilla limosa.

Una vez saturada del todo la muestra, se pasó a la fase de realizar el ensayo de la columna resonante. Las muestras que no son totalmente saturadas, no pasaron por el equipo triaxial, es decir, se ensayaron directamente con una cierta humedad (5%, 10%, 15%, 20%) y en consecuencia con un grado de saturación, mediante la columna resonante.

Las pruebas realizadas mediante la columna resonante, se llevaron a cabo en succiones inducidas por compactación y confinamiento isotrópicos, a fin de idear correlaciones entre las propiedades de rigidez de pequeñas deformaciones, módulo de corte y amortiguamiento del material.

La instrumentación asociada a la columna resonante muestra la frecuencia de la onda de excitación que se emite para aplicar a la muestra la fuerza cíclica, el valor V_{pp} pico-pico de dicha onda de excitación y de la onda de respuesta. Estas dos ondas se estudian en estado de resonancia, es decir, cuando entre las dos ondas el desfase es de 90° .

Durante los ensayos en la columna resonante se ha ido aumentando la amplitud de la excitación que genera el par torsor. Para cada etapa se ha buscado la frecuencia de resonancia asociada al módulo de corte. Finalmente, se ha parado la excitación emitida, viendo como la amplitud de la onda de respuesta disminuye en función del número de ciclos. La forma de esta disminución permite calcular el factor del amortiguamiento que tiene el material ensayado.

Los resultados obtenidos mediante la columna resonante, se han ido comparando paralelamente con los resultados obtenidos mediante ensayos en el equipo triaxial, realizados con muestras del mismo suelo y en

las mismas condiciones en un TFM desarrollado en paralelo (Navarro, 2019).

También se han realizado comparaciones con el trabajo anteriormente realizado en la Universidad Politécnica de Cataluña, (Poucell, 2016), obteniendo resultados y conclusiones muy parecidas.

2. OBJETIVO Y METODOLOGIA

2.1.OBJETIVO

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Máster, es estudiar el efecto de la saturación en el amortiguamiento de suelos compactados, en concreto la arcilla limosa del llano de Barcelona.

Teniendo en cuenta anteriores investigaciones y datos ya conocidos, lo que se ha querido conseguir es, obtener datos de dicha información en valores de los extremos del grado de saturación, es decir, cerca del valor $S_r = 1$ y $S_r = 0$. Debido a la dificultad de realizar ensayos en laboratorio con dichos grados de saturación, no suelen conseguirse datos fiables.

Para estudiar dicho fenómeno, se ha utilizado el equipo de la columna resonante. Con ayuda de este equipo, el objetivo es obtener el valor del factor de amortiguamiento D y el modulo de corte G , ambos dos en función de la deformación de corte γ .

El equipo de la columna resonante mide valores correspondientes a pequeñas deformaciones de corte, por lo que se ha querido comparar dichos valores con los medidos paralelamente mediante el equipo triaxial que se encuentra en el laboratorio de la Universidad Politécnica de Cataluña, teniendo en cuenta una realización de otro Trabajo Fin de Máster en paralelo (Navarro, 2019). De esta forma, puede verse la continuación del comportamiento del suelo correspondiente a valores de deformación de corte mayores y el cambio del amortiguamiento del suelo en dichos valores de deformación.

Para ello, y con el objetivo de obtener distintos valores de grado de saturación S_r , el objetivo es realizar distintos ensayos con distintas humedades, entre las cuales se encuentra una muestra totalmente saturada. Se ha considerado una sola densidad seca del material, con valor $1,63 \text{ Mg/m}^3$.

2.2.METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El programa experimental que se ha seguido para intentar conseguir el objetivo definido, es el siguiente:

1. En primer lugar, se ha tenido en cuenta la densidad seca del material, con un valor de $1,63 \text{ Mg/m}^3$.
2. El material se ha encontrado en dos circunstancias:
 - Como suelo natural almacenado en el laboratorio de la Universidad Politécnica de Cataluña
 - Como muestras ensayadas anteriormente para anteriores estudios (Poucell, 2016)

Por ello, se ha realizado un estudio granulométrico a ambos suelos, en el que se ha triturado el suelo con ayuda de un mazo de goma evitando romper las partículas originales.

Se han tenido en cuenta las mismas granulometrías para ambos tipos de suelo (natural y anteriormente ensayado) para tener la misma situación con ambas.

3. El suelo se ha pasado por el tamiz número 10 y se ha utilizado el suelo más fino para la realización

de los ensayos.

4. Se ha hallado el peso equivalente de suelo seco y agua para las humedades de valor: 5%,10%,15% y 20%.
5. Teniendo en cuenta estas humedades, se obtiene el grado de saturación que tiene la arcilla limosa de Barcelona en esas circunstancias.
6. Una vez definidos los valores de humedad y de grado de saturación, teniendo en cuenta el peso equivalente del suelo y del agua, se debe preparar el material para poder montar las muestras.
7. Se utiliza un molde cilíndrico para la manufacturación de las muestras, que crea muestras de 76mm de alto y de 38mm de diámetro. Con dicho molde, se compacta la muestra antes de ensayarlo.
8. El siguiente paso conlleva montar las muestras en la columna resonante. En el caso de las muestras saturadas, se lleva la muestra al equipo triaxial, esa se monta y se deja saturar durante 24 horas.
9. Una vez montada la muestra en la columna resonante se induce esta a una presión de confinamiento mediante aire comprimido de 2kg/cm^2 . (En el caso de la muestra saturada, este proceso debe alargarse hasta las 24 horas).
10. Una vez hecho esto, se somete la muestra a una carga cíclica mediante el equipo de la columna resonante, para poder obtener de esta forma los valores V_{pp} de la onda de excitación y de la onda de respuesta, así como el valor de frecuencia de la onda de excitación en el momento de resonancia con el sistema de la muestra.
11. Con los valores medidos, se consigue el objetivo de obtener los valores de factor de amortiguamiento D y módulo de corte G , respecto a la deformación de corte γ .
12. Una vez realizados los ensayos de laboratorio y habiendo obtenido los valores mencionados, se calculan distintos parámetros y se grafican; como por ejemplo:
 - a. Amplitud de la onda vs numero de ciclos (al parar la excitación).
 - b. Módulo de corte G vs deformación de Corte γ .
 - c. Factor de amortiguamiento D vs deformación de corte γ (de cada muestra, teniendo en cuenta los valores D_{\max} y D_0).
 - d. Deformación de corte γ vs Tensión de corte τ .
 - e. Factor de amortiguamiento vs grado de saturación S_r .
 - f. Deformación de Corte de referencia $\gamma_{0,7}$ vs grado de saturación S_r (Para cada muestra ensayada)
 - g. Módulo de corte G_0 vs grado de saturación S_r y humedad ω .
 - h. Módulo de corte G normalizado con el módulo de corte inicial G_0 (G/G_0) vs deformación de corte γ .
 - i. Factor de amortiguamiento D vs módulo de corte G normalizado con el modulo de corte

inicial G_0 (G/G_0).

- j. Módulo de corte G vs grado de saturación S_r .
- k. Comparación de resultados con el equipo triaxial, mediante gráficos;
 - i. Módulo de corte G vs deformación de corte γ
 - ii. Factor de amortiguamiento D vs deformación de corte γ
- l. Comparación de resultados obtenidos por Poucell (2016), mediante gráficos;
 - i. G/G_0 medio vs grado de saturación S_r .
 - ii. Factor de amortiguamiento D vs grado de saturación S_r (Para valores fijos de $\gamma = 10^{-3}$ y 10^{-5}).

3. ANTECEDENTES Y TRABAJOS PREVIOS

3.1. ANTECEDENTES

La dinámica de suelos, es una de las partes que se refieren a la mecánica de suelos, y trata de las propiedades y el comportamiento del suelo cuando este es sometido a esfuerzos dinámicos, es decir, a cargas rápidas.

Según se indica en Díaz Rodríguez (2005), las primeras investigaciones referente a la dinámica de suelos fueron realizadas por Okabe (1926), y Monobe y Matsuo (1929), en Japón, donde realizando un estudio pseudo-estático se quería evaluar las presiones sísmicas que desarrollan los suelos sobre los muros de contención. Este método, está basado en la aplicación de aceleraciones pseudo-estáticas a la cuña activa de Coulomb (1776), el primero en estudiar los problemas de presiones laterales en los suelos debido a los muro de contención, utilizando el equilibrio de fuerzas.

En cambio, Díaz Rodríguez (2005) indica que las ondas de interfaz entre dos semiespacios sólidos isótropos relacionados con la tensión y el desplazamiento, fueron analizadas y estudiadas por primera vez por Stoneley (1924). Estudio que posteriormente dio lugar a sucesivos análisis por otros geofísicos como Sezawa y Kanai (1935) y a la introducción del modelo de la viga cortante para análisis sísmicos de presas de tierra, por Mononobe (1936). Scholte (1947) analizó el rango de existencia de dichas ondas y Owen demostró que de los 900 materiales isotrópicos, solo treinta combinaciones proporcionan una interfaz que permite propagar a lo largo de esta una onda de Stoneley.

Respecto a las ondas sísmicas, la primera explicación del proceso físico de las ondas producidas se realizaron por Reid (1906), que estudió la fractura en la falla de San Andreas, debido un terremoto en San Francisco.

Más adelante, a partir de 1950, comenzaron los estudios del fenómeno de propagación de ondas en el terreno, debido a las explosiones nucleares, en los Estados Unidos de Norteamérica.

Okamoto (1973), publicó las características de los terremotos, la intensidad de estos, la sismicidad en Japón, junto a los grandes terremotos y los daños sufridos en consecuencia, por ello se indicaron también las propiedades dinámicas y el diseño de equipos de laboratorio necesarios para este tipo de investigaciones. Hizo hincapié en los daños ocasionados debido a dichos sismos, la relación con las condiciones locales e hizo un desarrollo de ciertas soluciones para el diseño sísmico de las estructuras.

Las investigaciones empezaron a ser más abundantes y más profundas debido al sismo de Anchorage, en Alaska, el año 1964 y al sismo de Niigata, en Japón, el año 1966. Sus numerosos daños dieron lugar a investigaciones sobre la propagación de ondas en el suelo y sus daños correspondientes, para poder entender el comportamiento de las masas del suelo durante los sismos. Dichas investigaciones tenían el objetivo de poder llegar a soluciones de diseño de las estructuras ante los sismos y sus comportamientos.

A partir de dichos estudios, la Dinámica de Suelos ha ido evolucionando, creciendo y entendiendo mediante estudios e investigaciones la necesidad de entender, describir, predecir y explicar el comportamiento dinámico del suelo y en consecuencia de las estructuras que se encuentran apoyadas y cimentadas en esta (Díaz Rodríguez, 2005).

3.2. TRABAJOS REALIZADOS PREVIAMENTE

Este tipo de estudios ha creado interés en el ámbito de la Universidad Politécnica de Cataluña como en distintas partes del mundo, dando lugar a diversos estudios respecto al amortiguamiento del terreno, el efecto de las cargas cíclicas y el empleo del equipo de la columna resonante. A lo largo de los años, se han reunido diversos trabajos con distintos datos, que han dado lugar a una base en la cual apoyarse y poder avanzar con ciertas certezas en el tema. Algunos de los trabajos que hablan sobre el amortiguamiento del terreno, el equipo de la columna resonante y la dinámica del suelo son los siguientes:

En primer lugar, puede hablarse del “Estudio de los movimientos sísmicos fuertes del suelo” redactado por Bolt (1989), que habla de las consecuencias de los fuertes sismos que pueden crearse y los efectos que esto puede tener en el suelo desde el punto de vista de la ingeniería. Habla de la consecuencia de construir obras civiles en zonas sísmicas y que es necesario tener en consideración la consecuencia del movimiento del suelo a pequeña distancia de fuentes sísmicas, ya que hasta el momento de dicho estudio, las investigaciones se centraban en las consecuencias en puntos lejanos del núcleo del sismo. En dicha fecha, se aumentó el número de acelerógrafos, proporcionando sismogramas de ondas sísmicas de alta energía a distancias muy cortas de la fuente. Por ello, era sumamente interesante explicar las características de los registros del movimiento del suelo ya registrados, y poder predecir el movimiento que puede tener el suelo ante determinados terremotos del futuro.

Se encuentra también un artículo de Suriol Castellví (1993), titulado “Medida de la deformabilidad del suelo mediante el equipo de columna resonante”, que trata de explicar el equipo como técnica de ensayo. Habla sobre todo, de que la columna resonante, es un equipo que complementa a otro tipo de ensayos de laboratorio, mostrando las bases físicas del funcionamiento de dicho equipo y sus resultados. Habla del procedimiento del ensayo en el equipo y lo aplica a un caso real, el caso del túnel urbano, donde se obtiene la curva de módulo de corte vs deformación de corte. Aclara que, el equipo de la columna resonante es capaz de cubrir un amplio intervalo de la curva módulo G vs deformación γ , pudiendo relacionar los mismos valores con los obtenidos en el equipo triaxial, ya que los resultados se deben enlazar (tal y como se ha comparado en este Trabajo Fin de Máster). Aclara en dicho artículo que, la columna resonante clásica permite realizar ensayos con suelos que tienen valores de módulo de corte G entre el rango de 10-300 MPa. Subraya también que, el hecho de ensayar suelos con rigidez mayor a la anteriormente mencionada, puede poner en peligro la rigidez del equipo mismo, por lo que los ensayos no serían los más idóneos.

Aclara que, efectivamente, el hecho de que en los resultados de la columna resonante se utilice el modelo no-lineal, hace indispensable el conocimiento de la curva modulo G vs deformación γ . Es subrayable que dicha curva sufre su mayor variación en el rango en el cual consigue sus resultados la columna resonante (deformaciones pequeñas), siempre teniendo en cuenta el tipo de terreno ensayado, esto puede verse en los gráficos conseguidos mediante la comparación de los resultados obtenidos mediante la columna resonante en este trabajo y los resultados obtenidos en el equipo triaxial, paralelamente ensayado (Navarro, 2019).

En el artículo de Assimaki, Kaurel, Whittle, (2000), de “Model for Dynamic shear Modulus and Damping for Granular Soils” se habla del modelo de ratio de amortiguamiento del material, el cual contiene cuatro parámetros que se utilizan para ajustar la variación de los factores de módulo de corte y los coeficientes de amortiguamiento con la deformación. Los módulos de cizallamiento y los factores de amortiguamiento pronosticados se acoplan de una forma muy bien aproximada con los valores comparados de los resultados de la columna resonante, por lo que en este trabajo, se ha utilizado dicho ajuste, entre otros, para poder obtener una aproximación con los resultados medidos en laboratorio.

Junto al artículo anterior, se encuentra el artículo de Brinkgreve, Kappert, Bonnier, (2017), de “Hysteretic damping in a small-strain stiffness model”, el cual habla de un estudio realizado mediante el modelo en “Plaxis” de “Hardening Soil” para pequeñas deformaciones, que tiene en cuenta el análisis para el amortiguamiento, teniendo en cuenta la histéresis. De esta forma, se consiguió una formula analítica para expresar el ratio de amortiguamiento local. Esta forma analítica se ha utilizado en este estudio para poder realizar otro de los ajustes respecto a los datos obtenidos en laboratorio.

Otálvaro (2008), en Medellín, se escribió el artículo “Evaluación de la respuesta dinámica de sitio para el sector de Aragón en Medellín”, describiendo los resultados de una investigación realizada tanto en campo como mediante un análisis numérico de las respuestas de sitio. Se trata de un estudio realizado mediante ondas, analizando las ondas sísmicas mediante el sistema down-hole. En este caso, a diferencia del Trabajo Fin de Máster que se presenta, los suelos que se estudian son originados a partir de la meteorización en ambientes tropicales. Para la realización de dicha investigación se utilizó la modelación del movimiento del terreno para el sismo sintético de diseño desarrollado por el Grupo de Sismología de Medellín, mediante modelos de propagación unidimensionales. Estas investigaciones son muy interesantes en el ámbito de la ingeniería civil, ya que proporcionan información mediante sus resultados sobre las estructuras que podrán estar apoyadas encima de este terreno y cómo se comportaría este en caso de sismo. Este método de ensayo, permite medir deformaciones de corte más pequeñas que las que mide la columna resonante.

Entre las tesis realizadas en la UPC, se puede encontrar un trabajo realizado por Villavicencio (2008), en la cual se ensaya mediante el equipo de columna resonante un material procedente de un terraplén experimental construido en Rouen (Francia). Para ello, se llevaron muestras inalteradas a laboratorio para

poder someterlas a carga cíclica mediante dicho equipo. De esta forma, se pudieron conseguir las propiedades dinámicas necesarias para el análisis y el diseño. Mediante este estudio, se quiso obtener la evolución de la densidad de una probeta en función de la deformación volumétrica y el comportamiento de la misma al ser sometida a diferentes presiones de confinamiento y paralelamente obtener el módulo de corte G , para la misma presión anteriormente mencionada. Este estudio se realizó mediante probetas remoldeadas y mediante probetas inalteradas. De esta forma, se consiguieron las curvas correspondientes al módulo de corte G respecto a la deformación en cada proceso de consolidación.

En el trabajo de Barchiesi, Fernández y Martín Placci, (2010), titulado “Construcción de una columna resonante y Primeras mediciones”, se explican las propiedades dinámicas del suelo, el funcionamiento del equipo, los componentes del equipo de la columna resonante y su funcionamiento, junto a cómo obtener las mediciones que este equipo puede realizar. Datos realmente útiles para el entendimiento de la realización de los ensayos laboratorios y poder saber de qué se trata la información que se obtiene. El objetivo de este trabajo era montar, diseñar y construir el equipo de columna resonante, realizando posteriormente una serie de mediciones para poder comprobar la fiabilidad de dicho equipo y sus resultados.

En cambio, en el artículo redactado por Gonzáles Blandón y Romo Organista, (2011), en México, denominado “Estimación de propiedades dinámicas de arcillas” utilizan el Modelo tipo Masing para evaluar la respuesta dinámica de un depósito de suelo y de sistemas suelo-estructura. La Regla de Masing (Ishihara, 1996), considera una ley constitutiva que define el comportamiento elástico (el rango de pequeñas deformaciones) y elasto-plástico (rango de grandes deformaciones) de los suelos. De esta forma y basándose en este modelo, se planteó un Modelo Modificado de Masing, que permite obtener mejores estimaciones de las propiedades dinámicas de las arcillas. Este modelo modificado está formulado exclusivamente para las propiedades dinámicas de las arcillas normalmente consolidadas.

Puede encontrarse también un Trabajo Fin de Grado, realizado en Chile por Araya Contreras (2017), llamado “Medición de parámetros dinámicos de arena con finos mediante columna resonante”. En este trabajo se realizaron ensayos de columna resonante en arenas. Al realizarse en un país en el cual se presentan un número abundante de sismos, se quiso realizar el estudio del amortiguamiento del terreno en arenas representativas, las cuales podrían sufrir algún sismo, teniendo en cuenta la historia de anteriores movimientos sísmicos. Pueden observarse también en la misma línea y en categoría de Trabajo Fin de Grado el estudio de Cruz (2017) en Bogotá con el trabajo realizado de “Influencia de los cambios de humedad en las propiedades dinámicas de arcillas reconstituidas, a través del ensayo de columna resonante”, en el cual se realizaron ensayos mediante este equipo en muestras de arcilla, con el objetivo de determinar las propiedades dinámicas de dicho suelo.

Por último y como trabajo previo de la UPC al Trabajo Fin de Máster que se expone, se encuentra el trabajo

de Poucell (2016), que trata del estudio de “Amortiguamiento en suelos compactados”, realizado mediante el equipo de columna resonante. En esta investigación se realizaron ensayos con distintos grados de saturación, no pudiendo conseguir datos muy fiables en los extremos de los valores $S_r = 1$ y $S_r = 0$ de dicho grado de saturación. Por lo que en continuidad a ello, y comparando los resultados con los ensayos realizados en el equipo triaxial, se ha realizado el siguiente trabajo.

4. EQUIPO UTILIZADO EN LABORATORIO

Para la realización de ensayos en suelos que son sometidos a carga dinámica, pueden utilizarse ensayos realizados en laboratorio y ensayos realizados en campo. Las ventajas de realizar ensayos en laboratorio, son, la relativa facilidad con las que se pueden cambiar las variables de ensayo, para así poder ver distintas circunstancias y el poder definir las condiciones de contorno. En cambio en los ensayos en campo, puede ensayarse un volumen mayor de suelo, con una alteración del suelo menor que en los ensayos de laboratorio. En el caso de este trabajo, los ensayos realizados han sido íntegramente en laboratorio.

Para realizar este estudio, se han utilizado distintos equipos, entre los cuales destaca la columna resonante. Son importantes también los aparatos utilizados para la realización de las muestras, tales como; la balanza, los tamices, el molde para realizar y compactar las muestras, el equipo triaxial – el cual ha sido utilizado por una parte para saturar las muestras y por otra parte para poder hacer una comparación de los resultados respecto a la columna resonante-, el horno, etc.

Más adelante, en el apartado 5.2.4., se puede ver explicado el montaje y la saturación de la muestra en el equipo triaxial de laboratorio.

4.1. COLUMNA RESONANTE

El equipo de la columna resonante, mide la respuesta del terreno respecto a la acción de una carga dinámica. Es importante mencionar que no se ha desarrollado un ensayo único que cubra todo el intervalo de deformaciones que requiere la solución de un problema de la dinámica de suelos (Díaz Rodríguez, 2005). Por ello, en este Trabajo Fin de Máster, se realiza el ensayo de la columna resonante y se compara con el ensayo del equipo triaxial, que abarcan los siguientes rangos de deformaciones respectivamente, junto a los ensayos sísmicos, los cuales miden los valores de deformación más pequeños (Imagen 1).

Por lo cual, en este estudio, se han realizado paralelamente ensayos de columna resonante y ensayos con el equipo triaxial, con probetas con las mismas características, para poder así contrastar los resultados obtenidos en ambos casos y verificar que estos mantienen una coherencia entre ellos.

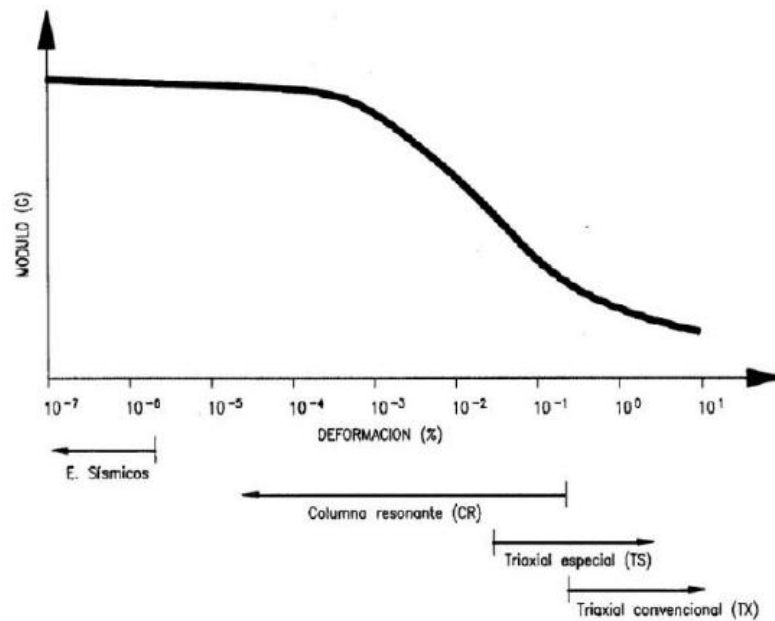


Imagen 1: Curva módulo de corte G vs deformación de corte – Atkinson & Salfords (1991).

El equipo de la columna resonante, es uno de los ensayos de laboratorio más utilizados para poder medir las propiedades del suelo respecto a deformaciones unitarias bajas (low-strain). En este ensayo, se utiliza una muestra cilíndrica – se explica en el apartado 5.2.2 preparación de la probeta– la cual se puede someter a cargas torsionales o axiales con ayuda de un sistema de carga electromagnética. Es decir, el equipo consta de unos imanes dentro de unas bobinas y se le aplica una carga cíclica en la cual los imanes vibran dentro de las bobinas, sin que se toquen entre ellas (Imagen 2 e Imagen 3).

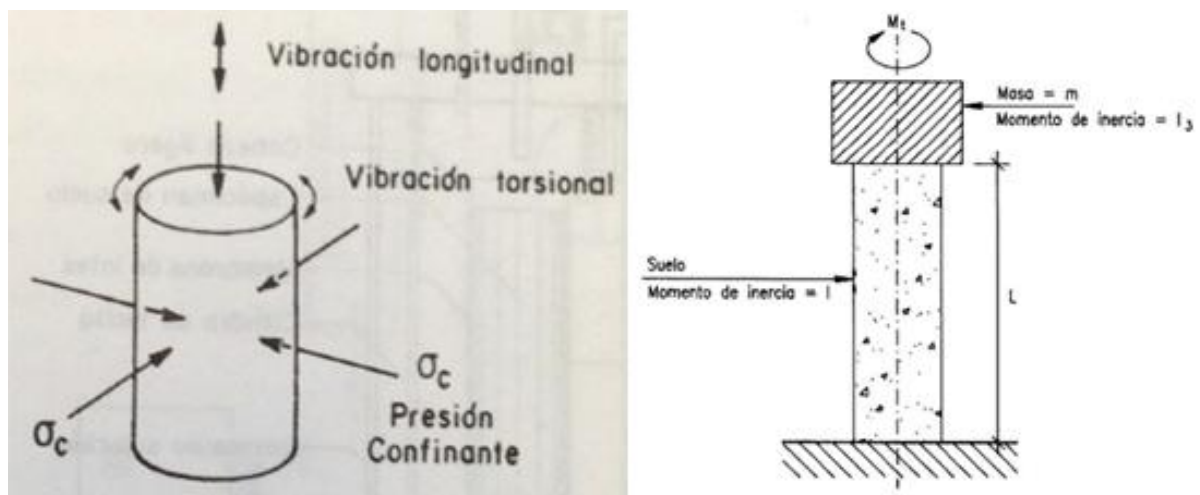


Imagen 2: Ensayo de columna resonante, vibración torsional del espécimen sólido.

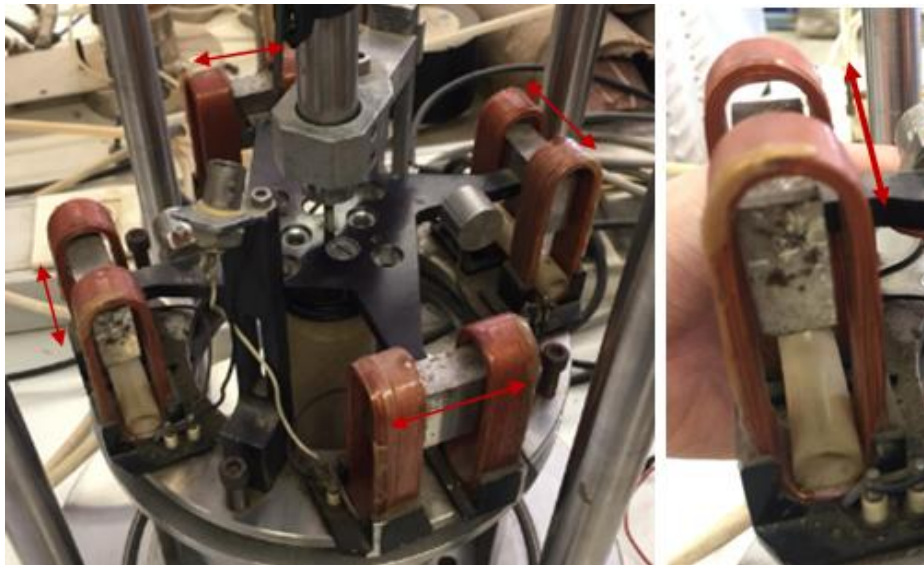


Imagen 3: Descripción gráfica de las bobinas y los imanes y sus movimientos en el cabezal de la columna resonante, sin tocarse entre ellas.

En este estudio en concreto, la carga aplicada se debe a carga torsional, manteniendo la muestra fija en la parte inferior y libre en la parte superior. A continuación (Imagen 4 e Imagen 5), puede verse un esquema del equipo completo de la columna resonante.

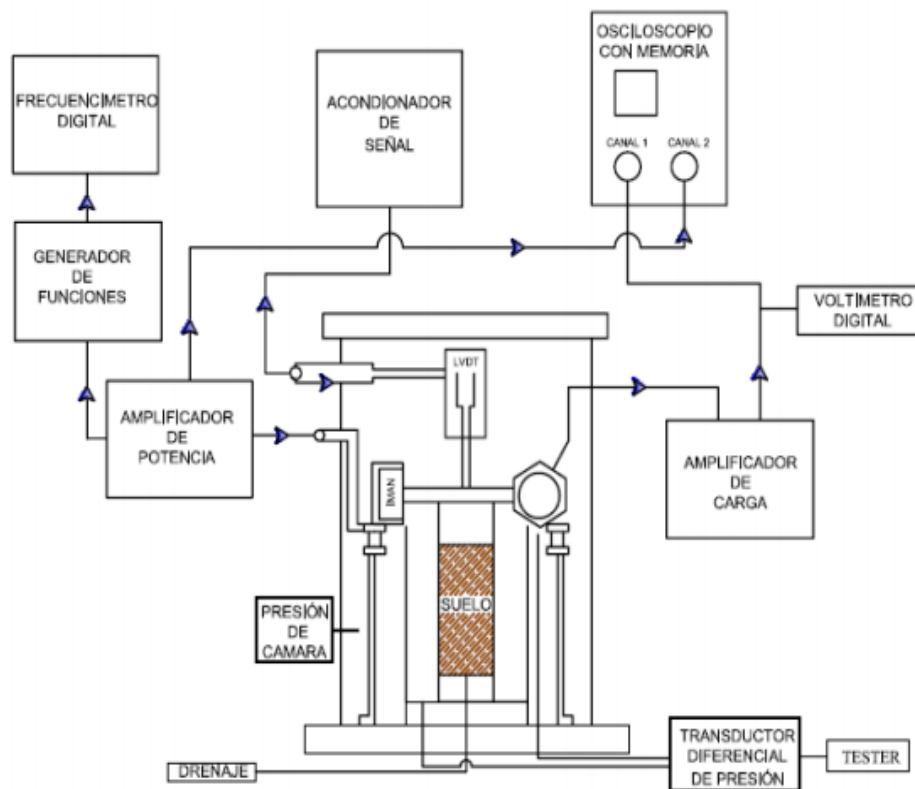


Imagen 4: Esquema de la columna resonante, Suriol (1993).

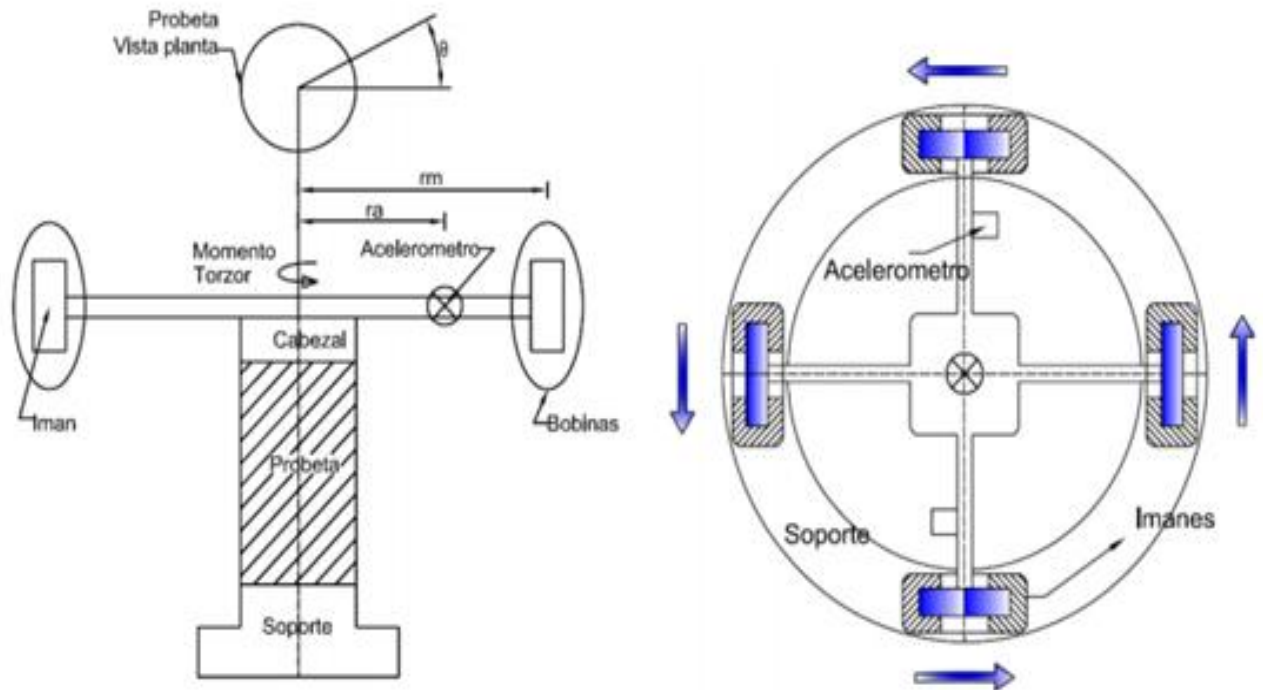


Imagen 5: Esquema de la probeta y el cabezal en la columna resonante; Castante, Chung & Vanderkooy (2003).

En este ensayo, se va variando el valor de la frecuencia de excitación hasta llegar al valor de la resonancia de la probeta cilíndrica. La resonancia es definida como la suma de las amplitudes de una misma frecuencia. Este fenómeno tiene lugar cuando a un sistema se le aplica una fuerza repetidamente y esta frecuencia de excitación coincide con la frecuencia natural que tiene el sistema. El resultado de ello, es la suma de las dos amplitudes, lo cual es capaz de desestabilizar estructuras complejas aún teniendo bajas intensidades, ya que, al sumar las amplitudes de cada ciclo, puede llegar a grandes deformaciones.

Una vez definida la frecuencia de resonancia del material, y teniendo en cuenta la teoría de propagación de ondas en medios elásticos continuos, puede evaluarse por una parte el valor de la velocidad tanto de la onda de corte (V_s) como la de la onda de compresión (V_p), el módulo de rigidez cortante (G), el factor de amortiguamiento (D) y el módulo de Young (E), entre otros parámetros.

4.2. PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO

En primer lugar, hay que tener en cuenta el ángulo de rotación promedio de la probeta cilíndrica que se ensaya, tal y como se puede ver en la Imagen 6, para que de esta forma, se pueda calcular la deformación de corte promedio $\bar{\gamma}$, como se ve representada en la siguiente fórmula (1):

$$\bar{\gamma} = \frac{2}{3} \gamma_{max} = \frac{2R\ddot{a}}{3R_a L (2\pi f)^2} = \frac{R k_{acc}}{12 \pi^2 R_a L} \frac{V_{pp}}{f^2} \quad (1)$$

Donde,

γ_{max} = Máxima deformación de corte

\ddot{a} = Aceleración lineal (medida con acelerómetro)

R = Radio de la muestra (0,019m)

L = Altura de la muestra (0,076m)

Ra = Radio de distancia al acelerómetro (0,051m)

f = Frecuencia

K_{acc} = Constante de calibración que se obtiene del acelerómetro (6,5 m/s²·v)

Vpp = Valor pico-pico en la salida del acelerómetro

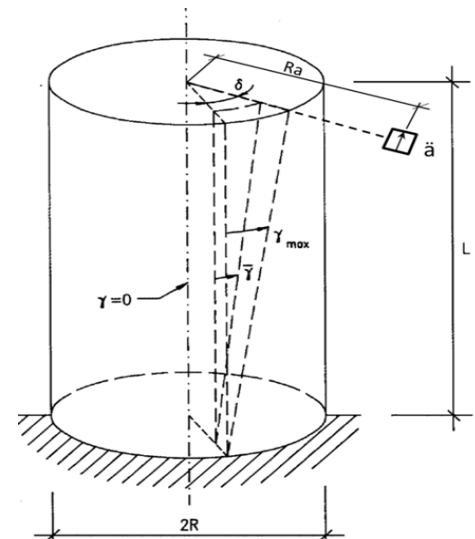


Imagen 6: Ángulo de rotación de la muestra.

4.2.1. OBTENCIÓN DEL MÓDULO DE CORTE G

En el cálculo del módulo de corte G mediante el ensayo de la columna resonante, el valor que se debe tener en cuenta es la frecuencia de resonancia. Teniendo en cuenta este valor y definiendo la constante K, se utiliza la siguiente fórmula (2) para el cálculo:

$$G = \frac{4\pi^2 \rho L^2}{\alpha^2} f r^2 = K f r^2 \quad (2)$$

Donde K se define de la siguiente forma y con una unidad de MPa·s²,

$$K = \frac{8\pi J_m}{R^4} L \quad (3)$$

Donde,

f = Frecuencia de resonancia (Hz)

ρ = Densidad del suelo

L = Altura de la probeta (0,076m)

Jm = Momento de inercia polar del sistema que oscila (0,0026 kg·m²)

R = Radio de la muestra (0,019m)

Para tener en cuenta la deformación de Corte γ , necesaria para alcanzar un porcentaje del módulo de corte inicial G_0 , se debe de considerar el estado de la muestra (la densidad seca de esta y el contenido de agua que tiene). Para ello, se analizó el resultado que se puede ver en la (Imagen 7), utilizando para ello (CIMNE-UPC-GEOLAB, 2014) el modelo “Hardening Soil con pequeñas deformaciones de torsión” teniendo cuenta el software PLAXIS, obteniendo como resultado la siguiente fórmula (4) (Poucell, 2016);

$$G(\gamma) = \frac{G_0}{1 + 0,385 \frac{\gamma}{\gamma_{0,7}}} \quad (4)$$

Dónde,

$$\frac{G(0,7)}{G_0} = 0,722 \quad (5)$$

Dónde, cuando G es igual a $0,722G_0$ la deformación correspondiente es $\gamma_{0,7}$.

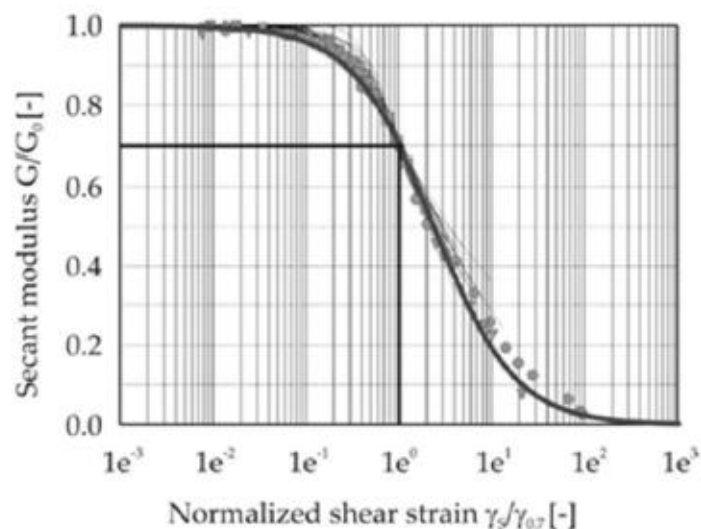


Imagen 7: Variación el módulo de corte G normalizado respecto a la deformación de corte normalizada en $\gamma_{0,7}$, Santos & Correja (2001).

4.2.2. OBTENCIÓN DEL FACTOR DE AMORTIGUAMIENTO D

Para medir el factor de amortiguamiento, se debe de dejar de excitar el cuerpo cilíndrico, y justo en ese momento se observa un decrecimiento logarítmico en las amplitudes de las crestas de la onda de respuesta. El decrecimiento logarítmico es llamado como μ . Teniendo en cuenta este decrecimiento se obtiene el valor del factor de amortiguamiento D mediante la siguiente expresión:

$$D = \frac{\mu}{2\pi} \quad (6)$$

Donde;

$$\mu = \frac{\ln\left(\frac{A_i}{A_{i+n}}\right)}{n} \quad (7)$$

μ = Decrecimiento logarítmico de la onda de respuesta

A_i = Amplitud de la onda en el ciclo n

A_{i+n} = Amplitud de la onda en el ciclo $i+n$

n = Número de ciclos de la onda

Por otra parte, se calcula el factor de amortiguamiento analítico teniendo en cuenta la deformación de corte γ_r , el cual se ha definido con la siguiente fórmula (8);

$$\gamma_r = \frac{\gamma_{0,7}}{0,385} \quad (8)$$

De esta forma se ha obtenido el valor del factor de amortiguamiento D , teniendo en cuenta cada deformación de corte minimizando los parámetros D_0 y D_{\max} (Poucell, 2016), tal y como se define en la fórmula (9) siguiente;

$$D = D_0 + D_{\max} \left[2 \left[1 + \frac{1}{\gamma_r} \right] \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}\right)}{\frac{\gamma}{\gamma_r}} \right] - 1 \right] \quad (9)$$

Teniendo esta idea como base, también se han calculado dos aproximaciones más, para el valor del factor de amortiguamiento, que son los siguientes:

- Ratio de amortiguamiento del material (Assimaki, Kaurel, Whittle, 2000), donde la fórmula que se usa para el cálculo del factor de amortiguamiento es el siguiente:

$$D(\gamma_r) = D_{\max} \left[1 - G(\gamma_r) \left(\frac{1}{6} C C_1 C_2 \tau_r^2 + \frac{1}{3} C (C_1 + C_2) \tau_r + C \right) \right] \quad (10)$$

Dónde,

$G(\gamma_r)$ = Modulo secante asociado con la amplitud de γ_r

τ_r = Tensión de corte asociada a la amplitud de γ_r

D_{\max}, C, C_1, C_2 = Tienen valores constantes para cada estado de tensión efectiva media σ'

Es un modelo simple, de cuatro parámetros que representa los factores de módulo de corte y los coeficientes de amortiguamiento para un suelo sometido a un esfuerzo impuesto por las ondas de corte de propagación vertical.

Los parámetros de entrada son funciones de la presión y densidad de confinamiento derivados de un modelo de suelo de esfuerzo efectivo generalizado y denominado MIT-S1.

Este modelo se ajusta a los valores obtenidos en laboratorio mediante la columna resonante.

- Amortiguamiento histerético en modelos de pequeña tensión de rigidez (Brinkgreve, Kappert, Bonnier, 2007), donde se utiliza la fórmula (11) para el cálculo del factor de amortiguamiento.

En este caso, se tiene como base el concepto de la histéresis, que corresponde a la tendencia de un material a conservar una de sus propiedades.

La curva de histéresis es representada en el gráfico de tensión deformación. De esta forma, puede calcularse el módulo de corte, que es definido como la relación entre la tensión, y la deformación de corte en un punto determinado de la curva. Teniendo en cuenta las distintas pendientes de la curva, pueden definirse los parámetros siguientes (Gráfico 1): Módulo de corte tangente G_{tan} , módulo de corte secante G_{sec} , o módulo de corte máximo G_{max} .

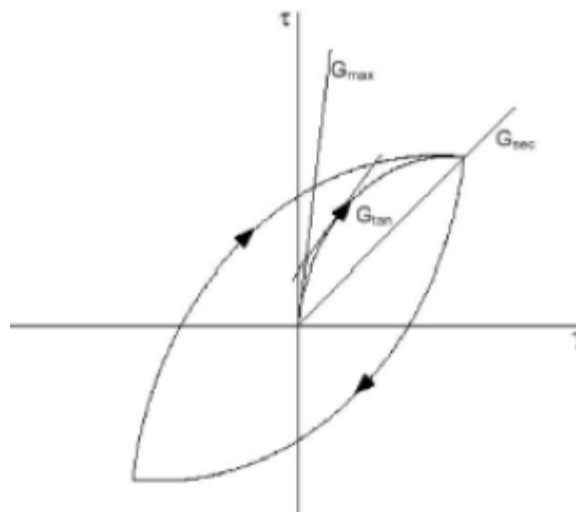


Gráfico 1: Curva de histéresis, deformación de corte respecto a la tensión de corte. Definición de los módulos de corte (Hardin & Drnevich, 1972).

De esta forma, el módulo de corte G se relaciona con el módulo de Young E .

$$D = E_{min} + \frac{ED}{4\pi ES} \quad (11)$$

Dónde,

$$E_D = \frac{4 G_0 \gamma_{0,7}}{a} \left(2\gamma_r - \frac{\gamma_r}{1 + \frac{\gamma_{0,7}}{a\gamma_r}} - \frac{2 \gamma_{0,7}}{a} \ln\left(1 + \frac{a\gamma_r}{\gamma_{0,7}}\right) \right) \quad (12)$$

$$E_S = \frac{1}{2} G_S \gamma_r^2 = \frac{G_0 \gamma_r^2}{2 + \frac{2a\gamma_r}{\gamma_{0,7}}} \quad (13)$$

Dónde,

a = Tiene un valor constante para cada estado de tensión efectiva media σ' .

Es interesante tener en cuenta la representación correspondiente al módulo de corte normalizado respecto al módulo de corte inicial (curva de reducción de módulo), en la cual el módulo de corte tiene una tendencia descendiente respecto al aumento de la deformación. En cambio, el amortiguamiento, dependiendo del nivel de deformación y con el aumento de este, también tiene una tendencia ascendente, tal y como puede verse en Gráfico 2.

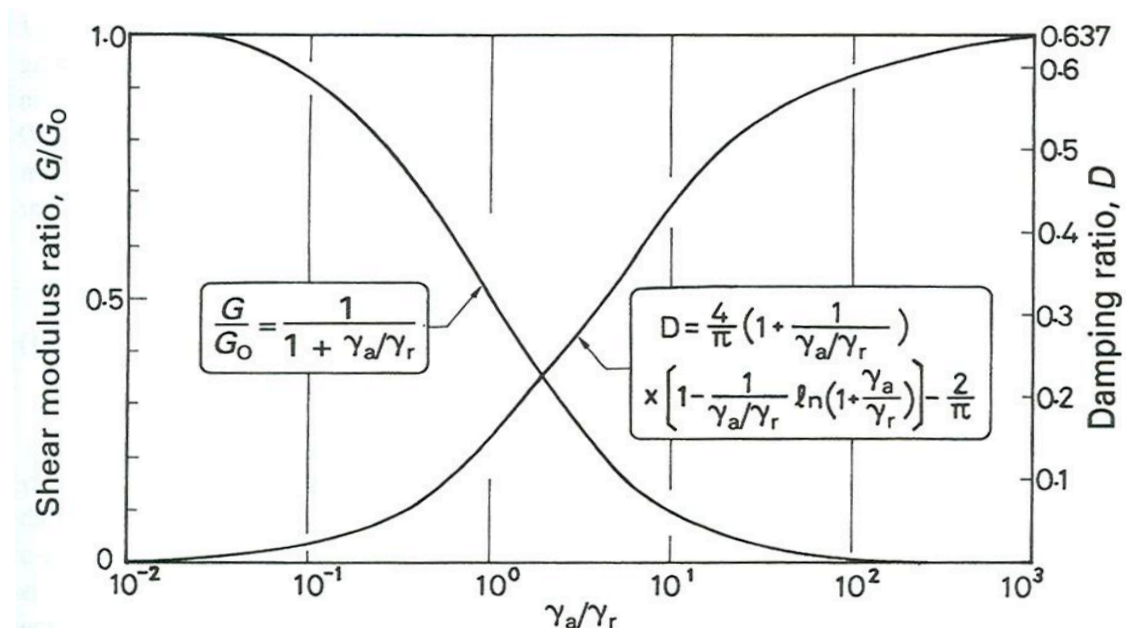


Fig. 3.11 Shear modulus ratio and damping ratio for hyperbolic model.

Gráfico 2: Variación de la curva de módulo de corte normalizada y el factor de amortiguamiento respecto a la deformación de corte (Ishihara, 1996).

4.2.3. OBTENCIÓN DE LA PERMEABILIDAD DEL SUELO

Para obtener la permeabilidad del suelo, se tiene en cuenta una muestra saturada, la cual se ha compactado con una humedad inicial del 15%. Esta se ha llevado al equipo triaxial de laboratorio y se ha dejado saturar durante 24 horas. El equipo triaxial proporciona los datos de volumen (V) y tiempo (t), con

los cuales definen un gráfico, con el tiempo representado en el eje X y el volumen representado en el eje Y (Puede verse en el apartado 8.2. Permeabilidad de la muestra saturada). Teniendo en cuenta esto se obtiene el valor del caudal Q.

$$Q = \frac{V}{t} \quad (14)$$

Se ha considerado la pendiente de esta recta, desde el punto en el que esta se mantiene constante, de esta forma obteniendo el valor Q.

Por otra parte, se tiene en cuenta el gradiente, que sabiendo el valor de la presión de cola, y la altura de la muestra se ha calculado de la siguiente forma;

$$i = \frac{H3-H1}{h} \quad (15)$$

Donde,

H3 = Presión de cola de la base de la muestra (mca)

H1 = Presión de cola de la parte superior de la muestra (mca)

h = Altura de la muestra (0.076m)

Una vez ya conseguidos los valores del caudal (Q) y del gradiente (i) se ha calculado el valor de la permeabilidad del suelo de la arcilla limosa de Barcelona, de la siguiente forma;

$$Q = k \cdot i \cdot A \quad (16)$$

Donde;

Q = Caudal

k = Permeabilidad

i = Gradiente hidráulico

A = Área de la muestra

5. MATERIAL Y METODOLOGÍA UTILIZADA

5.1. MATERIAL UTILIZADO

El material utilizado para realizar esta investigación es la arcilla limosa de baja plasticidad del llano de Barcelona. Teniendo en cuenta los previos estudios de investigación realizados, este material puede encontrarse almacenado en el laboratorio de mecánica de suelos del Campus Nord, en la Universidad Politécnica de Cataluña. Este suelo, se encuentra tanto en forma de probetas realizadas anteriormente para ser estudiado en el mismo laboratorio, como en forma de suelo natural. En el caso concreto de este Trabajo de Fin de Máster, se han utilizado las dos opciones, es decir, el suelo natural y suelo de probetas anteriores. En primer lugar, se ha tenido en cuenta el suelo natural, al cual se le han intentado separar las partículas con ayuda de un martillo de goma, para no romper las partículas, tal y como se puede ver en la Imagen 8. Una vez hecho esto, se ha tamizado utilizando el tamiz numero 10 (2 mm), ya que esta será la parte del suelo que se debe utilizar para la realización del ensayo.



Imagen 8: Suelo natural y los martillos de goma utilizados para no romper las partículas de este.

De la misma forma y sin romper las partículas del suelo, se deshacen las probetas que se encuentran en laboratorio en forma cilíndrica. Se ha comparado la granulometría que se tiene en las probetas utilizadas para anteriores investigaciones (Poucell, 2016) y el suelo natural que se tiene entre manos. Por lo que se realiza la granulometría por separado, sea la del suelo natural de la arcilla limosa del llano de Barcelona, como el de las probetas de laboratorio de la misma, con el objetivo de clasificar el suelo según la carta de Unified Soil Classification System, SUCS.

Para la realización de dicha granulometría, se tienen dos recipientes, por una parte, un recipiente con el suelo natural pasado por el tamiz numero 10 (2mm), y por otro lado otro recipiente con el suelo de las

muestras deshechas, también tamizadas por el mismo tamiz, pero en este caso, al estar anteriormente tamizadas, todas las partículas pasan por el tamiz. Pueden verse los dos recipientes en la Imagen 9 con sus respectivos pesos (suelo + recipiente).



Imagen 9: Suelo natural a la izquierda y suelo de muestra de laboratorio a la derecha peso de suelo + recipiente.

Para realizar la granulometría del suelo, se han utilizado seis tamices, todos ellos con una abertura menor a la del tamiz numero 10 (2mm), tal y como se puede ver en las Tabla 1 y Tabla 2. Una vez realizada la granulometría del suelo, se comparan las dos granulometrías y se toma como base la granulometría conseguida de las muestras anteriores de suelo que se tenían (Poucell, 2016), ajustando de esta forma la granulometría del suelo natural y teniendo una sola granulometría para todo el suelo a ensayar, Tabla 3. El objetivo de tomar como base la granulometría de las muestras anteriores, es que de esta forma los resultados pueden compararse con los resultados de estudios anteriores.



Imagen 10: Suelo natural separado por distintos tamaños, por cada tamiz.

Por lo cual, se dejan por separado las partículas de distinto tamaño del suelo natural, separados gracias a los tamices, de esta forma se realiza una corrección que ayudará a ajustar la granulometría de esta a la del suelo de las muestras, utilizando la misma proporción de partículas de cada tamaño. Pueden verse los recipientes separados del suelo natural de la arcilla limosa del llano de Barcelona en la Imagen 10.

- Suelo de muestras de investigaciones realizadas anteriormente en la UPC:

Suelo de muestras							
TAMIZ N°	Abertura (mm)	Peso Tamiz (g)	Peso Tamiz + Suelo (g)	Peso Suelo (g)	% Retenido	%Ret acumulado	% Pasa
10	2	400	400	0	0	0	100
74	1,6	389,15	453,77	64,62	7,67	7,67	92,33
77	1,2	373,77	490,26	116,49	13,82	21,48	78,52
186	0,4	341,5	614,01	272,51	32,33	53,81	46,19
95	0,15	322,8	477,87	155,07	18,39	72,20	27,80
200	0,074	340,07	433,57	93,5	11,09	83,29	16,71
Base	0	362,24	501,77	139,53	16,55	99,84	0,16
					99,84		

Suelo muestra + recipiente(g)	1145,2
Peso recipiente (g)	302,17
Peso suelo (g)	843,03

Tabla 1: Granulometría correspondiente al suelo de las muestras de laboratorio.

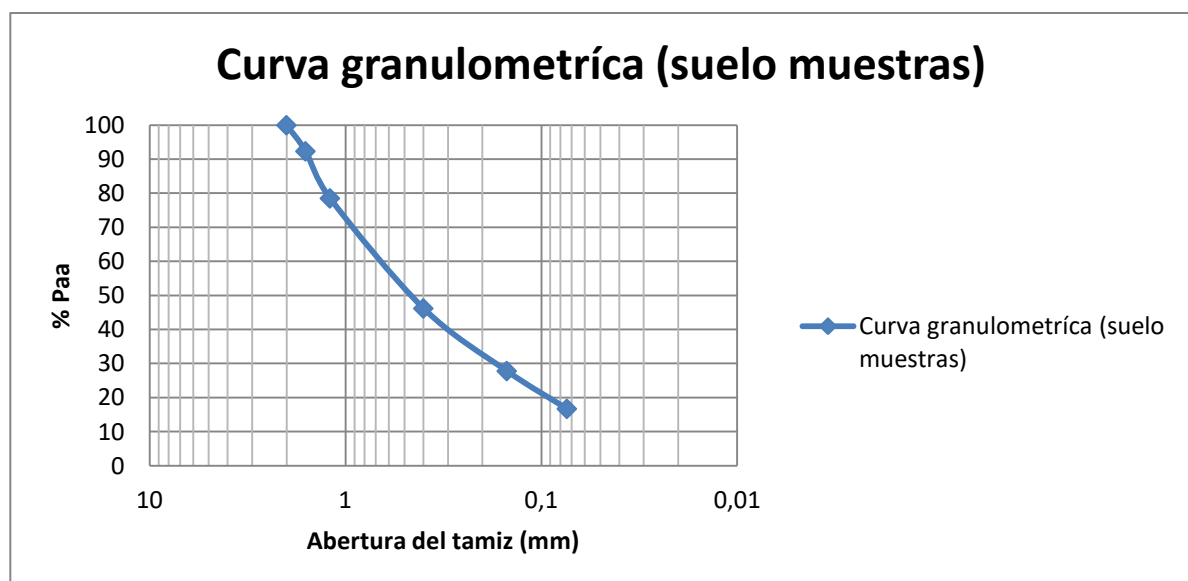


Gráfico 3: Curva granulométrica de suelo de muestras anteriores de laboratorio.

- Suelo natural, arcilla limosa del llano de Barcelona:

Suelo natural							
TAMIZ N°	Abertura (mm)	Peso Tamiz (g)	Peso Tamiz + Suelo (g)	Peso Suelo (g)	% Retenido	% Ret acumulado	% Pasa
10	2	400	400	0	0	0	100
74	1,6	389,15	517,87	128,72	14,16	14,16	85,84
77	1,2	373,77	541,25	167,48	18,42	32,58	67,42
186	0,4	341,5	637	295,5	32,50	65,07	34,93
95	0,15	322,8	473,68	150,88	16,59	81,67	18,33
200	0,074	340,07	429,92	89,85	9,88	91,55	8,45
Base	0	362,24	438,65	76,41	8,40	99,95	0,05
					99,95		

Suelo natural + recipiente (g)	1206,7
Peso recipiente (g)	297,44
Peso suelo (g)	909,26

Tabla 2: Granulometría correspondiente al suelo natural almacenado en el laboratorio.

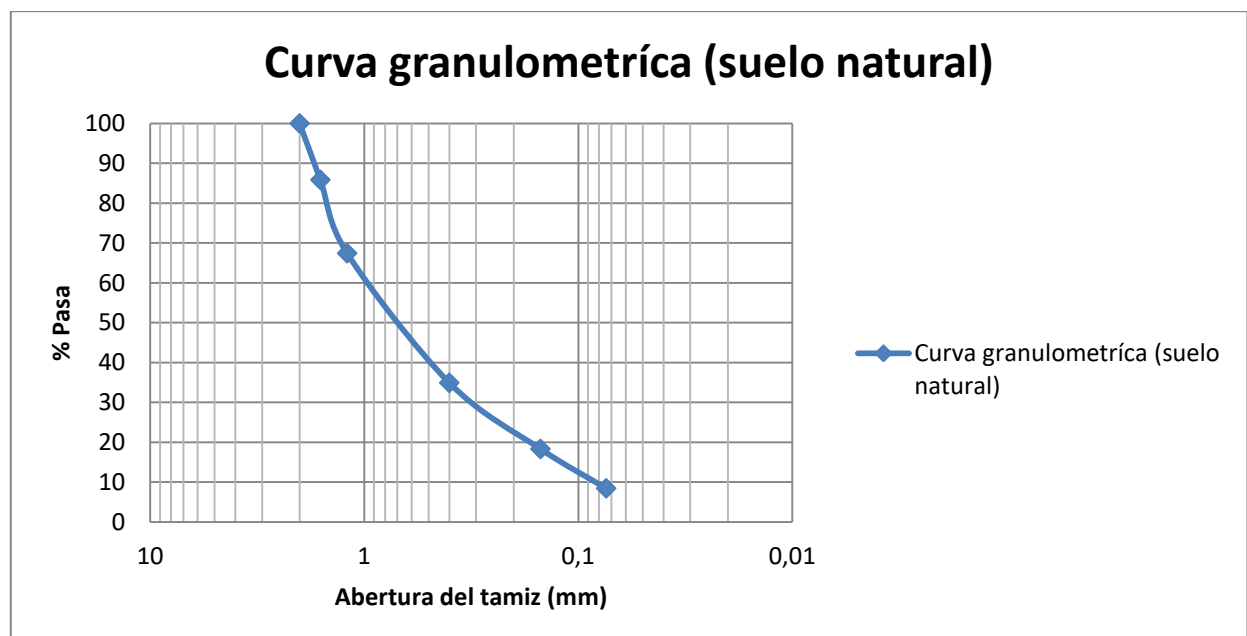


Gráfico 4: Curva granulométrica de suelo del suelo natural almacenado en laboratorio.

- Corrección de la granulometría del suelo natural basado en la granulometría del suelo de las muestras:

Ajuste granulométrico del suelo natural												
Peso proporcional (g)	sobra (g)	Necesario (g)	sobra (g)	% Ret	% Ret acum	% Pasa	Peso tamiz (g)	Peso tamiz + suelo	Peso suelo (g)	%Ret	%Ret acum	%pasa
0	0	0		0	0	100	400	400	0	0	0	100
69,70	59,02	35,39	93,33	7,67	7,67	92,33	389,22	421,53	32,31	7,00	7,00	93,00
125,64	41,84	63,79	103,69	13,82	21,48	78,52	373,83	435,94	62,11	13,45	20,45	79,55
293,92	1,58	149,23	146,27	32,33	53,81	46,19	341,34	491,78	150,44	32,59	53,04	46,96
167,25	-16,37	84,92	65,96	18,39	72,20	27,80	322,75	407,06	84,31	18,26	71,30	28,70
100,85	-11,00	51,20	38,65	11,09	83,29	16,71	340,16	393,16	53,00	11,48	82,78	17,22
150,49	-74,08	76,41	0,00	16,55	99,84	0,16	362,20	438,39	76,19	16,50	99,28	0,72

Peso total (g)	461,7
----------------	-------

Tabla 3: Corrección de granulometría del suelo natural, basándose en los valores del suelo de las muestras.

En la Tabla 3 puede verse, en la primera columna, el peso proporcional que debería de haber en cada tamiz teniendo en cuenta el peso total de suelo natural que se tiene, que como se ve en la Tabla 2 es de 909,26g. En la segunda columna, puede verse coloreado, el valor limitador, que pertenece a la base de los tamices, es decir, la cantidad de peso del suelo que ha pasado por el tamiz numero 200 (0,074 mm). Respecto a este valor limitador se han calculado los valores que son necesarios para una misma proporción granulométrica y se ha realizado el cálculo de que, el peso total del suelo natural que se utilizará será de 461,7g.

Puede comprobarse que la granulometría queda ajustada en ambos casos en el siguiente Gráfico 5.

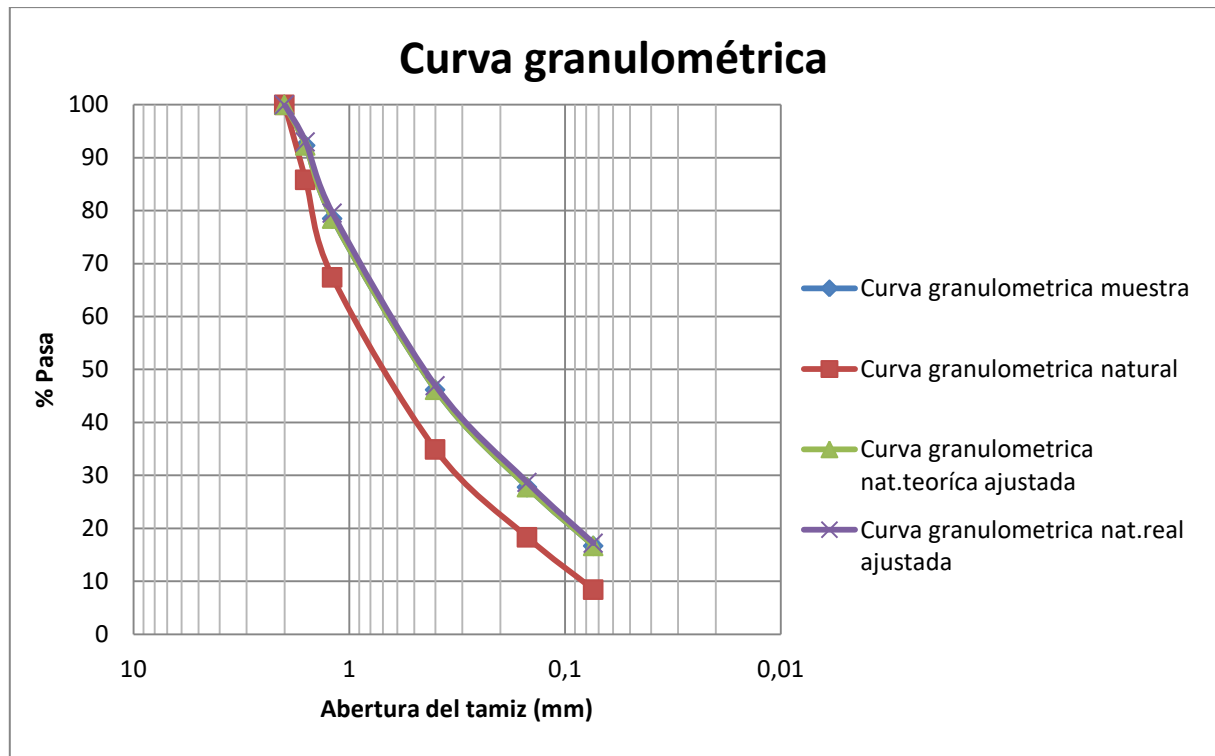


Gráfico 5: Curvas granulométricas ajustadas (suelo natural y suelo de muestras).

Una vez teniendo la misma granulometría, las dos cantidades de suelo se pueden mezclar para poder realizar de esta forma la investigación. Por lo que se tiene un peso total de suelo a ensayar de 1304,69g.

Este material ha sido ensayado durante mucho tiempo en el departamento de Ingeniería Civil y Ambiental (Gens, et al., 1995) (Suriol, et al., 1998) (Suriol & Lloret, 2007), por lo que es conocida la densidad de las partículas sólidas de 2,69 Mg/m³.

Se ha calculado por otra parte, la humedad natural del terreno. De esta forma, al realizar los distintos ensayos, se tiene la información necesaria para poder añadir el agua que se requiere en cada ensayo y muestra. Para calcularlo, se utiliza la siguiente fórmula:

$$\omega_0 = \frac{\text{Peso húmedo} - \text{Peso seco}}{\text{Peso húmedo}} \cdot 100 \quad (17)$$

En primer lugar, se ha pesado el valor del suelo húmedo y se ha colocado en el horno a 110°C de temperatura, dejándolo durante 24 horas para que se seque. Se ha vuelto a pesar y se ha obtenido el peso del suelo seco. Hay que tener en cuenta siempre el peso del recipiente que se está utilizando para realizar dichas mediciones. De esta forma y con la fórmula anteriormente mencionada se obtiene la humedad

natural que tiene el suelo de arcilla limosa del llano de Barcelona. Los datos mencionados se pueden ver en la Tabla 4, así como el valor de la humedad natural de 1,398%.

w ₀	0,01398
W _{suelo húmedo}	142,458
Recipiente	58,92
Recipiente +suelo húmedo	98,26
Recipiente + suelo seco	97,71
Suelo húmedo	39,34
Suelo seco	38,79

Tabla 4: Datos de la arcilla limosa del llano de Barcelona, con el resultado de la humedad natural de 1,398%.

Las muestras que se han utilizado para la realización del ensayo en laboratorio tienen las medidas destacadas en la Tabla 5 y representadas en la Imagen 11. Las probetas se han procurado realizar con una densidad seca de 1,63Mg/m³.

Probeta		
H	76	mm
D	38	mm
r	19	mm
V	86192,7	mm ³

Tabla 5: Medidas de las muestras cilíndricas que se realizan para los ensayos.

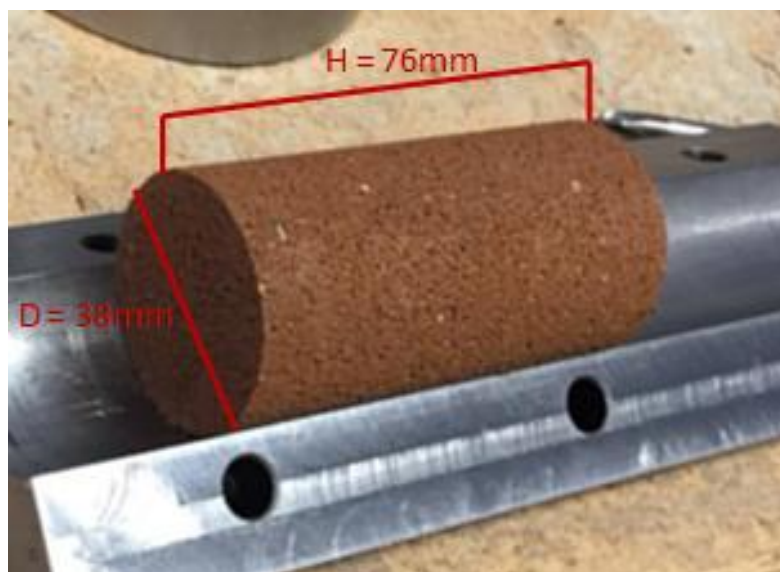


Imagen 11: Muestra cilíndrica con y sus medidas.

5.2. METODOLOGÍA DE ENSAYO

5.2.1. PREPARACIÓN DE MATERIAL

Una vez que la granulometría es correcta se ha dispuesto de un total de 1.304,69g de suelo que se ha utilizado para la realización de las probetas. Dicho suelo está pasado ya por el tamiz número 10, con una apertura de 2mm. Se deben tener en cuenta distintas humedades (ω) para distintos grados de saturación (S_r) y de esta forma se ha calculado el peso de suelo con humedad 1,398% que es necesario y cuánta agua se le debe añadir para conseguir la humedad deseada, tal y como puede verse en la Tabla 7, para una densidad seca de $1,63\text{Mg/m}^3$. Se tienen en cuenta los grados de saturación (S_r) que se acerquen a los extremos, es decir, a los correspondientes a $S_r = 0$ y a $S_r = 1$, y las humedades correspondientes a dichos valores.

Los conceptos de la Tabla 7 corresponden a:

$$W_s = \gamma_d \cdot V \quad (18)$$

$$W_w = \frac{W_s \cdot \omega}{100} \quad (19)$$

$$W_w \text{ añadir} = W_w - \omega_0 \cdot W_s \quad (20)$$

$$W_{\text{suelo natural}} = (1 + \omega_0) \cdot W_s \quad (21)$$

Donde;

W_s = Peso de suelo seco

γ_d = Densidad seca

V = Volumen total de la muestra

W_w = Peso de agua necesario

ω = humedad

$W_w \text{ añadir}$ = Peso de agua que le falta al suelo natural para obtener la humedad deseada

$W_{\text{suelo natural}}$ = Peso de suelo con humedad 1,398% que es necesario para obtener la humedad deseada

ω_0 = Humedad natural del suelo

$$V_s = \frac{W_s}{\gamma_d} \quad (22)$$

$$V_w = \frac{W_w}{\gamma_w} \quad (23)$$

$$V_a = V - V_s - V_w \quad (24)$$

Donde;

V_s = Volumen de suelo seco

V_w = Volumen de agua necesario

V_a = Volumen de aire

$$S_r = \frac{V_w}{V_w + V_a} \cdot 100 \quad (25)$$

Donde;

S_r = Grado de saturación

Densidad seca	0,00163	g/mm ³
Ws	140,494	g
Ys	0,00269	g/mm ³
Yw	0,001	g/mm ³

Tabla 6: Parámetros del suelo arcilla limosa de Barcelona.

$\gamma_d = 0,00163 \text{ g/mm}^3$								
W (%)	Ws (g)	Ww (g)	Vs (mm ³)	Vw (mm ³)	Va (mm ³)	Sr	Ww (g) añadir	Wsuelo húmedo (g)
2	140,494	2,809	52228,3	2809,8	31154,5	8,2	0,845	142,458
4	140,494	5,619	52228,3	5619,7	28344,6	16,5	3,655	142,458
5	140,494	7,024	52228,3	7024,7	26939,7	20,6	5,060	142,458
6	140,494	8,42	52228,3	8429,6	25534,7	24,8	6,465	142,458
8	140,494	11,239	52228,3	11239,5	22724,8	33,1	9,275	142,458
10	140,494	14,049	52228,3	14049,4	19915,0	41,3	12,085	142,458
12	140,494	16,859	52228,3	16859,3	17105,1	49,6	14,895	142,458
14	140,494	19,669	52228,3	19669,1	14295,2	57,9	17,704	142,458
15	140,494	21,074	52228,3	21074,1	12890,3	62,04	19,109	142,458
16	140,494	22,479	52228,3	22479,1	11485,3	66,1	20,514	142,458
18	140,494	25,288	52228,3	25288,9	8675,4	74,4	23,324	142,458
20	140,494	28,098	52228,3	28098,8	5865,5	82,7	26,134	142,458
22	140,494	30,908	52228,3	30908,7	3055,7	91,0	28,944	142,458
24	140,494	33,718	52228,3	33718,6	245,82	99,2	31,754	142,458

Tabla 7: Valores de peso del suelo y de agua necesarios para cada porcentaje de humedad y grado de saturación.

Una vez calculadas las proporciones necesarias para cada humedad, se ha procedido a la preparación del suelo. Es decir, se ha tenido en cuenta un peso de suelo natural de 142,46g de peso (Imagen 12) y se le añadirá el agua necesaria para cada humedad (ω) y grado de saturación (S_r) tal y como se ha mencionado en la Tabla 7.



Imagen 12: Peso de suelo de 142,46g antes de añadirle el agua deseada.

Para poder añadir el agua en la cantidad justa, se coloca el recipiente con suelo natural en la báscula y con ayuda de un pulverizador de agua se añade agua poco a poco (Imagen 13). Al añadir el agua se va mezclando el suelo para que la humedad sea uniforme en todo el suelo, Imagen 14.



Imagen 13: Procedimiento para añadir el agua poco a poco con ayuda de un pulverizador.



Imagen 14: Suelo mezclado con el agua necesaria para una humedad concreta.

Una vez se tiene la cantidad de agua necesaria bien mezclada, se vuelve a pasar el suelo por el tamiz numero 10 (2mm), para poder evitar grumos que pueden crearse al añadir el agua (Imagen 15). Se vuelve a pesar, por si ha perdido humedad en el intervalo de tamizar, en el caso positivo se le añade el agua que le falta y se cierra bien el recipiente, dejándolo reposar durante 3 o 4 días. De esta forma, se asegura que la humedad no se pierda y que se uniformice en todo el suelo que se tiene en el recipiente (Imagen 16).



Imagen 15: Tamiz número 10 con suelo ya húmedo, para evitar grumos al añadir agua.



Imagen 16: Suelo húmedo y cerrado para que la humedad sea uniforme en toda la muestra.

5.2.2. PREPARACIÓN DE LA PROBETA

Para poder fabricar la probeta, se utiliza un molde cilíndrico como el que se ve en la Imagen 17. Se desmonta el molde y se le añade un poco de aceite para evitar que la muestra se pegue a las paredes al intentar sacarla.



Imagen 17: Piezas utilizadas para el montaje y compactación de las muestras en laboratorio.

Una vez hecho esto se monta el molde, ajustando los tornillos (sin apretar demasiado, Imagen 18) y se coloca la base del molde. Entre la base y el molde cilíndrico, se han colocado unos tacos (Imagen 19), para

de esta forma poder ir compactando la muestra, tanto por arriba como por abajo, al mismo tiempo. Es decir, se quitan los tacos de la base a la vez que se coloca la pieza de la cabeza del molde, para compactar la muestra uniformemente.



Imagen 18: Montaje del molde cilíndrico.



Imagen 19: Tacos y cabezal para compactación.

Montado el molde con la base y los tacos, se añade el suelo dentro de este, para después ir compactándolo como anteriormente se ha detallado, tal y como puede verse en la Imagen 20. Se añade el peso de suelo húmedo –que ha estado reposando durante 3 o 4 días- calculado anteriormente, dentro del molde y se deja un 15% más de suelo húmedo, para así calcular la humedad de cada muestra que se realiza y ensaya.



Imagen 20: Procedimiento empleado para colocar el suelo dentro del molde cilíndrico.

Con en el suelo necesario dentro del molde, se retiran los tacos de la base, y con ayuda del pistón que se introduce por el cabezal del molde cilíndrico se va compactando la muestra. Seguidamente, se quita la base del molde y se introduce un cilindro metálico que es ligeramente más largo que el molde, para poder sacar la muestra más fácilmente, sin llegar a romperla. Estos pasos pueden verse en las Imagen 21 e Imagen 22.



Imagen 21: Pieza cilíndrica que ayuda a poder sacar la muestra más fácilmente sin romperla.

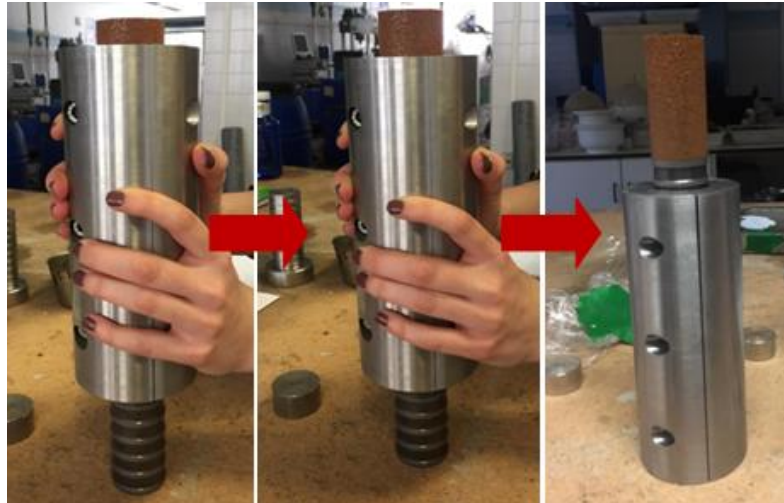


Imagen 22: Pasos a seguir para poder sacar la muestra con facilidad.

Una vez se tiene la muestra compactada, se vuelve a pesar y se deja envuelta y etiquetada para que no pierda su humedad, Imagen 23. El ensayo se realizará al cabo de un tiempo.



Imagen 23: Muestra preparada y envuelta para que no pierda la humedad.

5.2.3. MONTAJE LA PROBETA EN LA COLUMNA RESONANTE

Una vez habiendo dejado la muestra un tiempo envuelta, se ha montado en el equipo de la columna resonante. En primer lugar, se coloca la muestra en la base del equipo, la cual tiene una piedra porosa colocada por defecto, igual que el cabezal. Encima de este se coloca la pieza del cabezal, Imagen 24.

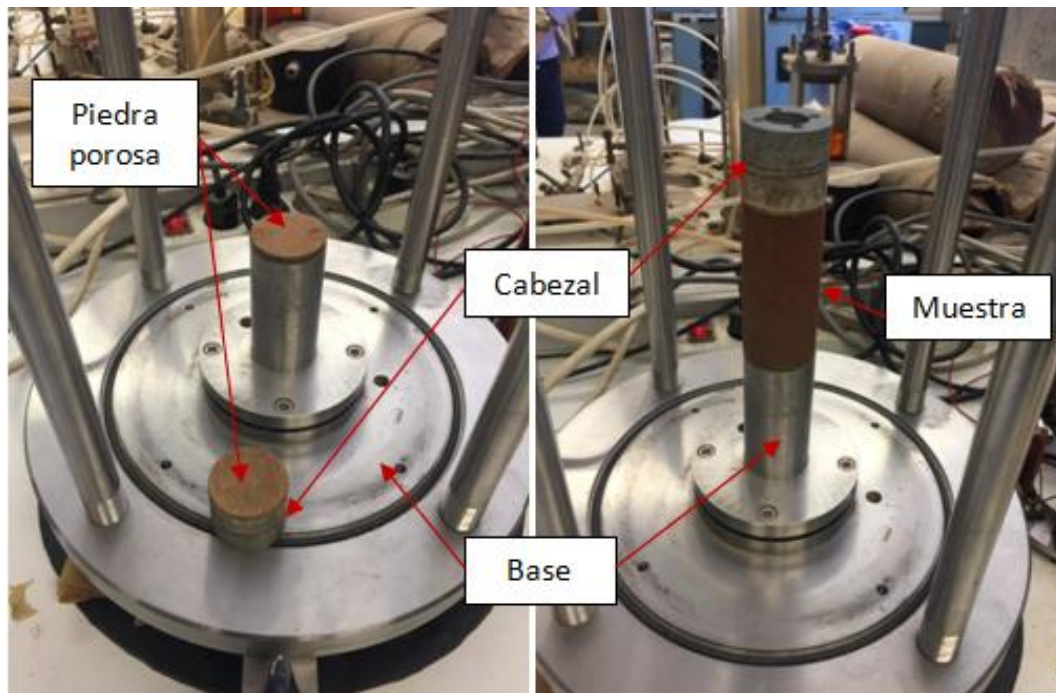


Imagen 24: Base y cabezal de la columna resonante, con sus respectivas piedras porosas.

Al tener la muestra colocada en la base, con el cabezal encima, se procede a colocar la membrana de látex, para evitar que la muestra pierda la humedad que se le ha impuesto y esté aislada de los factores externos. A ser posible, se colocan dos membranas, para asegurar la estanqueidad de la muestra por si una de estas se rompe o fractura.

Para colocar la membrana, es necesaria la ayuda de un cierto instrumento, Imagen 25, punto 1. Dicho instrumento está compuesto por un cilindro metálico, que tiene una perforación con un tubo, que se utiliza para poder sacar el aire de la membrana y quede pegada a la muestra sin burbujas de aire. Por lo cual, se coloca la membrana por dentro del instrumento y aspirando el aire por el tubo se consigue que la membrana quede completamente sujeta al cilindro y sin aire entremedio. Los extremos sobrantes de la membrana que salen del cilindro, se colocan por la parte exterior de este, para que quede completamente sin aire y pueda colocarse en la muestra con facilidad, Imagen 25. El cilindro con la membrana sin aire, rodea la muestra y se suelta, dejando la membrana bien colocada en la muestra, cubriendo la muestra del suelo, parte de la base donde se coloca esta y el cabezal. Es importante tener en cuenta, que a ser posible es mejor colocar primero la membrana por la parte inferior, de manera que quede sujeta a la base inmóvil de la columna resonante, evitando que la muestra pueda moverse o volcar. Así después se colocará la membrana en la parte superior, la cual sujetará el cabezal.

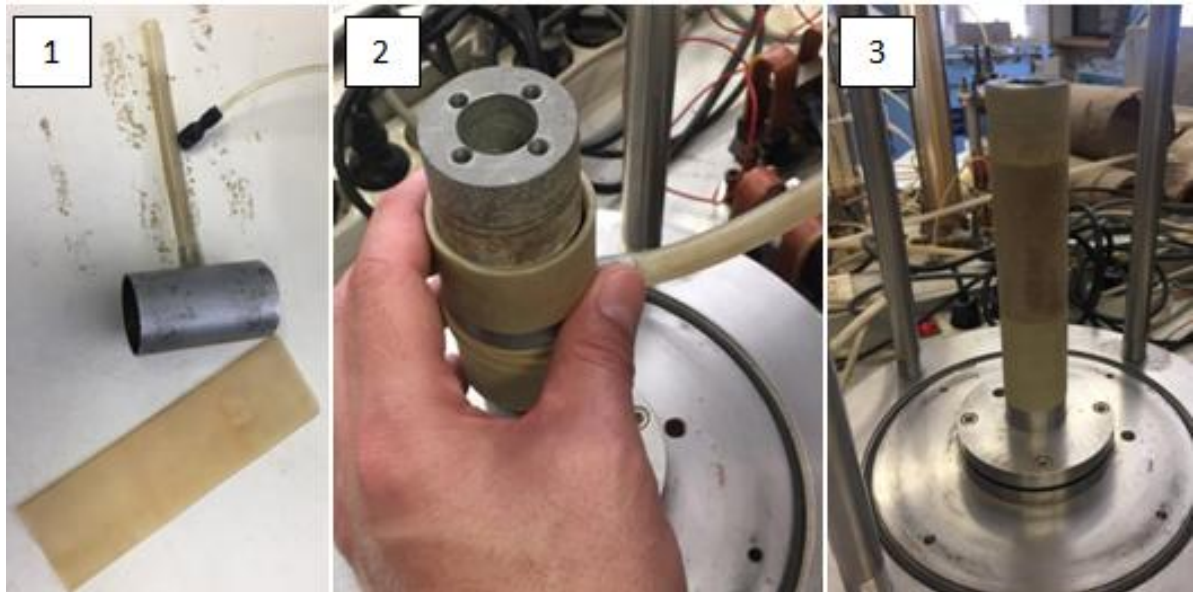


Imagen 25: Instrumento y colocación de las membranas de látex.

Al colocar la membrana en la muestra, se deben colocar 4 tóricas, dos de ellas en la parte superior, sujetando el cabezal y dos de ellas en la parte inferior, sujetas a la base (Imagen 26). Estas tóricas se colocan también con ayuda del cilindro metálico con el que se colocan las membranas.



Imagen 26: Tóricas y su colocación.

Una vez hecho esto, se debe colocar la pieza que rodea la muestra, que ha sido anteriormente desmontada (Imagen 27) para que no moleste en el proceso de colocar la muestra, junto a las membranas y a las tóricas.

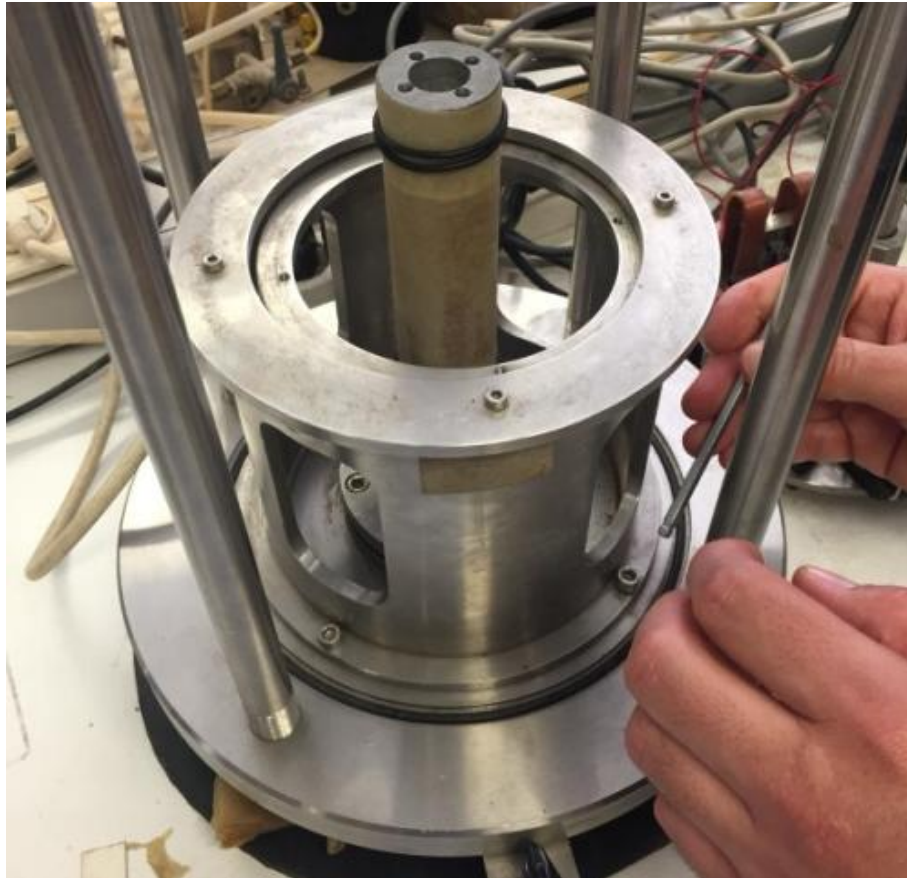


Imagen 27: Pieza metálica de la columna resonante que rodea la muestra.

Al tener la muestra con la membrana colocada adecuadamente y con las tóricas en su sitio, se coloca el cabezal de la columna resonante, de manera que se ajustan los tornillos del cabezal para encajarlo a la muestra. Es importante apretar bien los tornillos al cabezal. Al colocar esta pieza es importante tener en cuenta que:

- La pieza tiene que estar adecuadamente centrada para que los imanes no toquen la bobina, Imagen 28.
- El imán tiene que estar un poco más alto que a media altura, porque la muestra –y en consecuencia el cabezal- asienta un poco y se debe evitar que los imanes toquen la parte de abajo.
- Para poder ajustar estas medidas se deben atornillar o desatornillar los tornillos que se muestran en la Imagen 28.

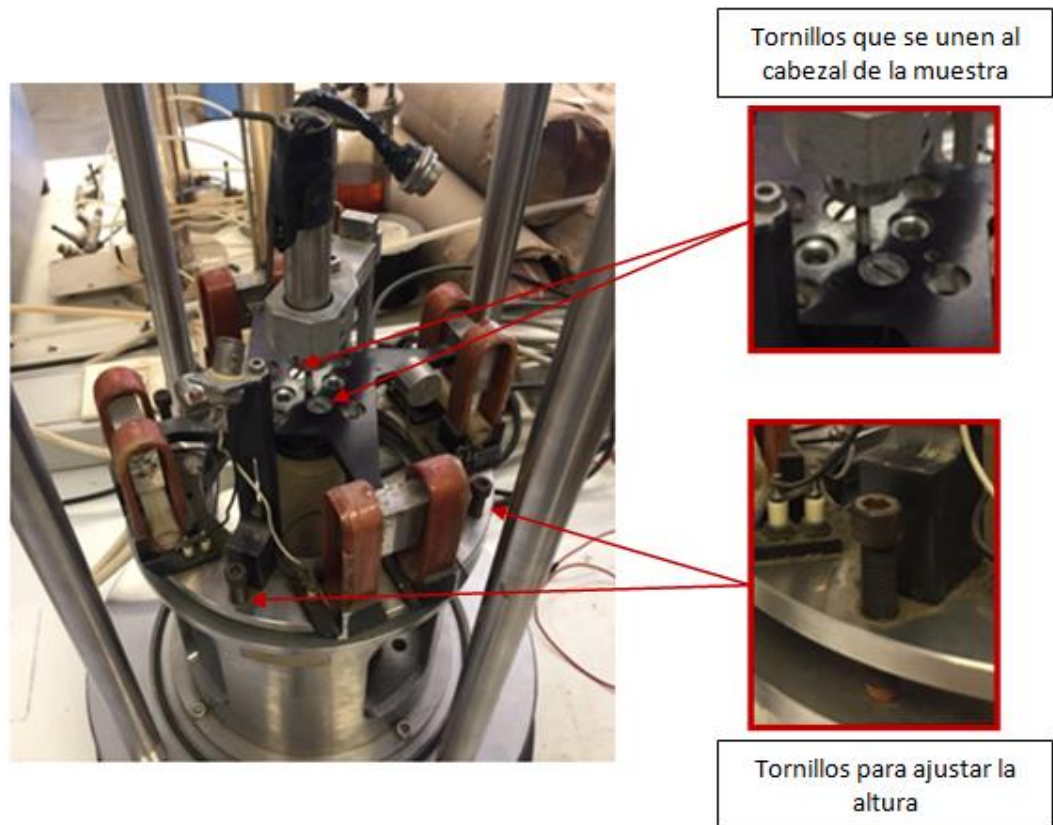


Imagen 28: Cabezal de la columna resonante y los tornillos que este tiene para distintos usos.



Imagen 29: Imán y bobina colocados para que no se toquen entre ellos.

A continuación, se debe unir el anillo flotante a la parte del cabezal de la columna resonante mediante los tornillos mostrados en la Imagen 30. Posteriormente, se coloca la cámara metálica, la cual tiene tres puertos que se deben unir mediante cables al equipo para poder obtener los datos de la columna resonante, Imagen 31. Es importante poner dicha cámara con cuidado sin golpear la parte de central de la columna resonante.

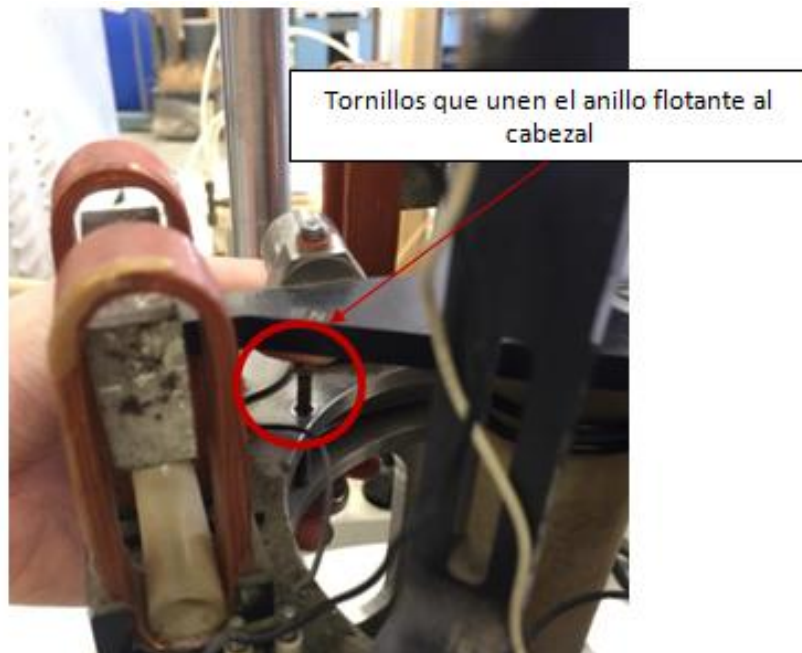


Imagen 30: Procedimiento para unir la pieza anillo flotante al cabezal que se ha colocado a la columna resonante, mediante tornillos.



Imagen 31: Cables y puertos que tiene la columna resonante para poder conectar los equipos necesarios para las mediciones.

Una vez colocada la cápsula metálica se conectan los cables a través de la cápsula, de esta forma quedan conectados el cabezal de la columna resonante a la cámara metálica y de la cámara metálica los equipos que se utilizarán (Imagen 31 y Imagen 32).

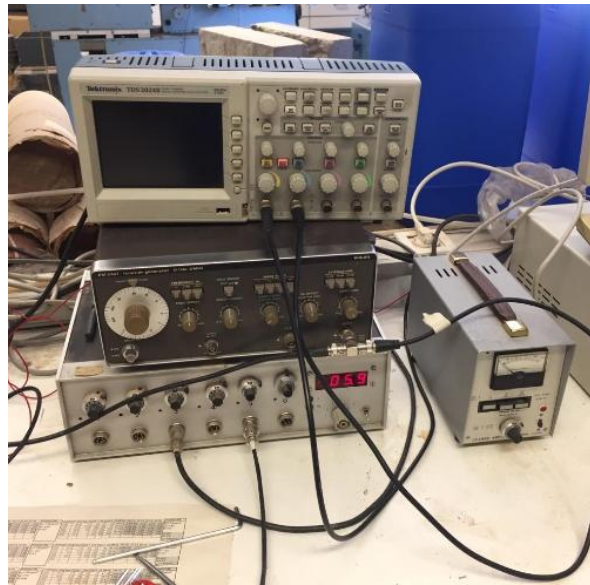


Imagen 32: Equipos a los que se conecta la columna resonante.

Finalmente se debe colocar la tapa, se aprietan los tornillos para cerrarla correctamente, Imagen 33. Se pone en marcha el aire comprimido, conectándolo mediante un tubo de entrada, el cual dispone de un mecanismo mediante válvula, que permite regular el aire comprimido que entra dentro de la columna resonante, que será siempre de un valor de 2kg/cm^2 . Para dejar que el aire comprimido pase, se abre en primer lugar la válvula número (1) y finalmente la válvula de entrada a la columna resonante (2), que pueden verse marcadas en la Imagen 34. Llegado a este punto, se puede apreciar el sonido del aire comprimido que entra en el equipo, indicando que la muestra está consolidando. En el caso de las muestras que están saturadas a un mayor grado de saturación que el 80%, es necesario dejarlas consolidar durante 24 horas bajo la presión de confinamiento creada por el aire comprimido.



Imagen 33: Tapa cerrada mediante tornillos bien ajustados, para poder aplicar el aire comprimido.

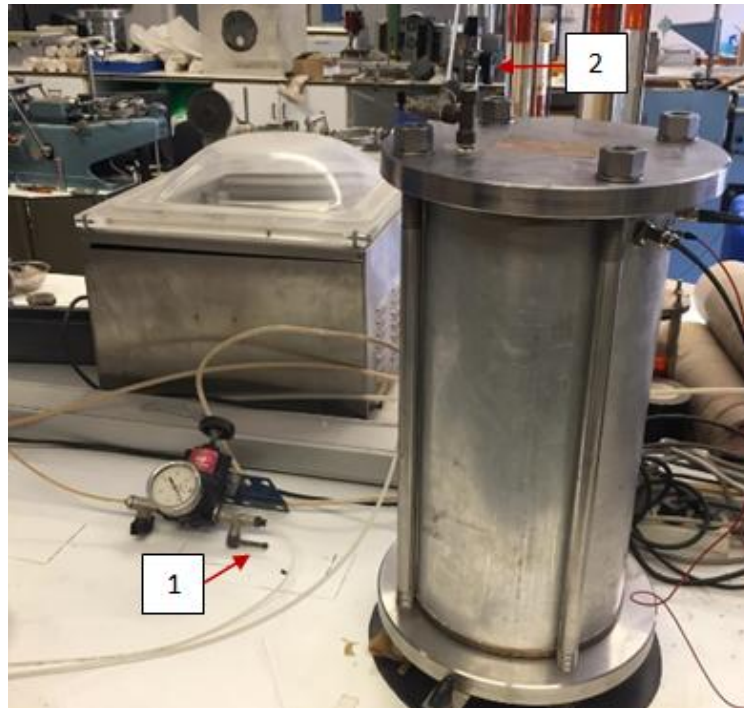


Imagen 34: Válvulas que controlan el paso del aire comprimido.

Una vez la muestra está consolidada, se vuelve a comprobar que está todo bien colocado y conectado. Al comprobar que está todo correctamente conectado, está todo listo para poder realizar el ensayo.

5.2.4. SATURACIÓN DE LA PROBETA EN EL EQUIPO TRIAXIAL

Para realizar ensayos con muestras saturadas, estas se han saturado en el equipo triaxial, para después poder llevarlas ya saturadas al equipo de la columna resonante. Para ello, una vez fabricada la probeta se han seguido los siguientes pasos para montar la muestra en el equipo triaxial y saturarla:

En primer lugar, se debe comprobar que la base que está colocada en el equipo es de diámetro de la probeta que se va a colocar, en este caso diámetro de 38mm. En caso contrario, se reemplaza la base por el diámetro deseado, tal y como puede verse en la Imagen 35.



Imagen 35: Base del equipo triaxial en laboratorio.

Una vez hecho esto y teniendo en cuenta que la muestra se va a saturar, se llenan todos los conductos de agua, verificando que todo el sistema está saturado. Para ello se encenderán primero los pistones de los controladores de presión/volumen y por último la caja con los acondicionadores de señal, que pueden verse representadas en la Imagen 36.

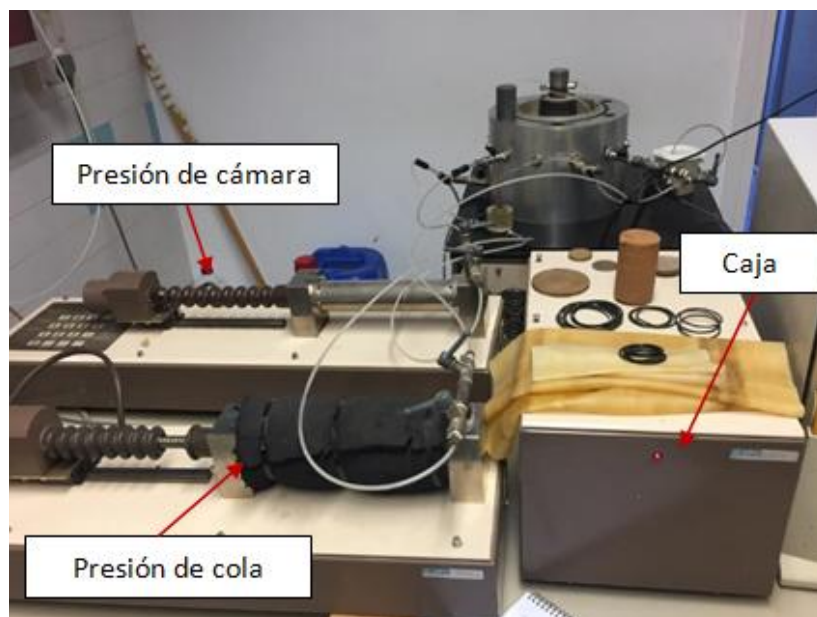


Imagen 36: Controladores (Presión de cámara y presión de cola) y caja del equipo triaxial.

Una vez esté el sistema saturado, se comprueba que desde el cabezal y desde la base sale el menor volumen de aire posible, Imagen 37. A continuación, se deben colocar dos piedras porosas, una en la base de la muestra y la otra en la parte superior. Una vez colocadas las piedras porosas, se colocan las membranas, se procuran poner dos para asegurar la estanqueidad de la muestra en caso de que una de las dos tenga alguna fisura, así evitando que el agua de la cámara entre dentro de la muestra. Para colocar las membranas se utiliza el mismo método que en la columna resonante.

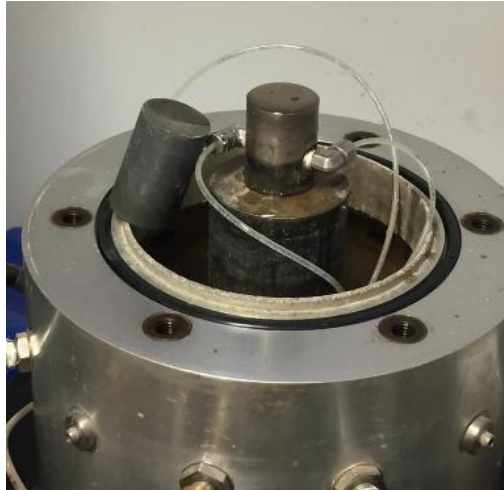


Imagen 37: Imagen representativa que muestra que del cabezal y de la base no sale aire (burbujas).

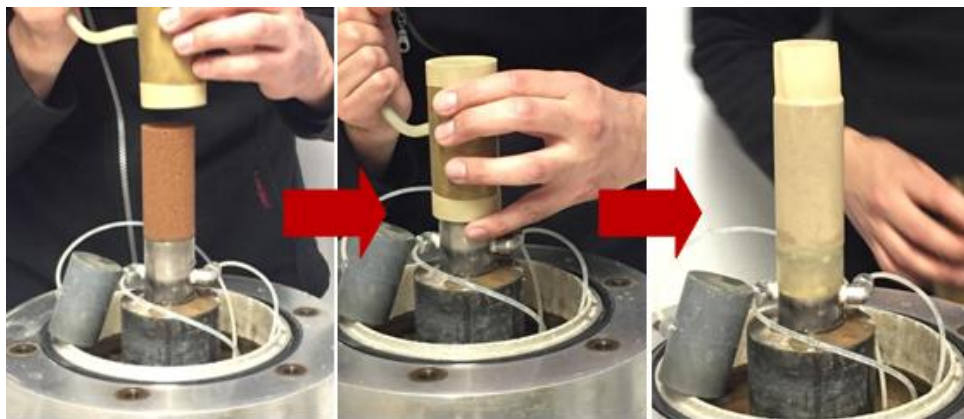


Imagen 38: Colocación de las membranas de látex en el equipo triaxial.

Una vez teniendo las membranas puestas (Imagen 38) se deben colocar cuatro tóricas, dos de ellas abajo, uniendo la membrana y la base del triaxial y dos arriba, uniendo las membranas al cabezal. En este caso, el cabezal contiene un tubo, el cual no permite colocar las tóricas de la misma forma en la que se ponen en el equipo de la columna resonante. Por ello, se utilizan dos piezas, las cuales pueden verse en la Imagen 39, y de esta forma al colocar las tóricas, estas dos piezas se separan pudiendo sacarlas sin problemas. En la Imagen 40, puede verse la muestra montada en el triaxial con las tóricas colocadas.

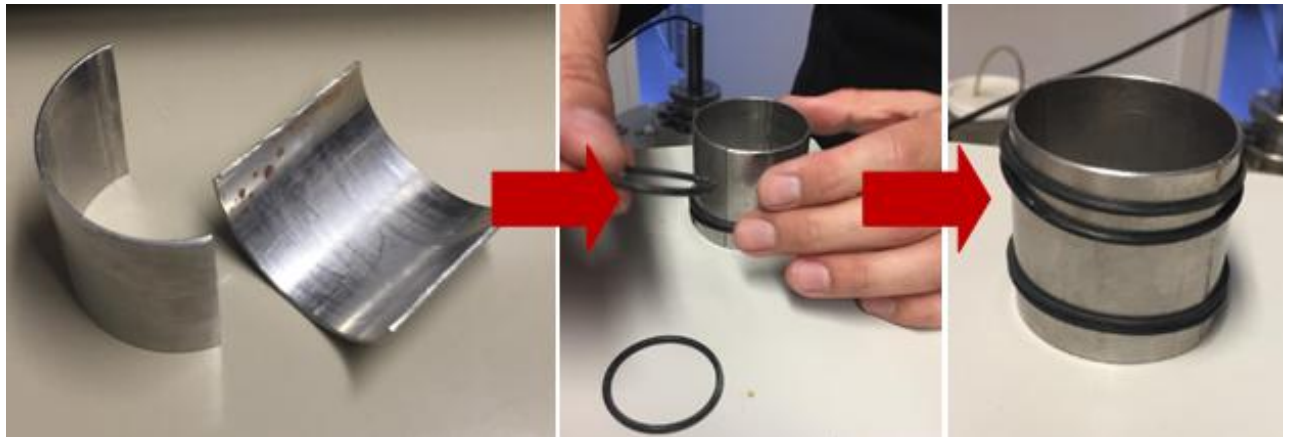


Imagen 39: Pieza utilizada para poder colocar las tóricas en el equipo triaxial.

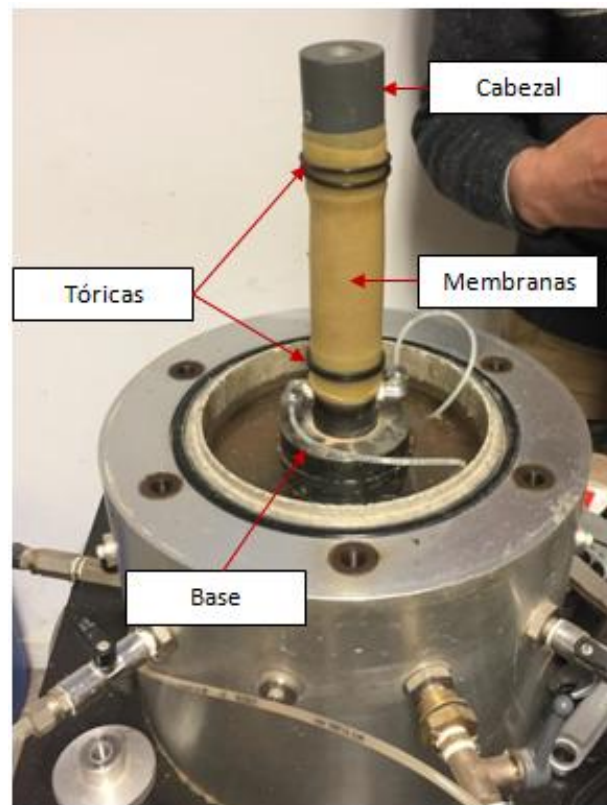


Imagen 40: Muestra colocada en la base del equipo triaxial.

Es importante que la base donde se coloca la muestra, este totalmente bajada y esto se realiza con ayuda del programa de ordenador. Una vez comprobado esto, se monta la cámara del triaxial, Imagen 41.

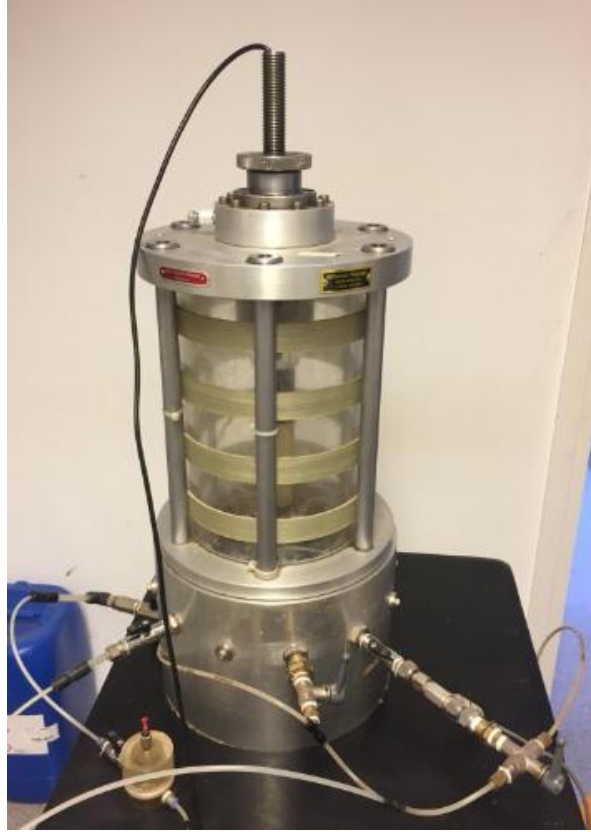


Imagen 41: Equipo triaxial con la cámara montada y cerrada.

Una vez montada y bien cerrada se llena de agua la cámara. Seguidamente a los pistones se les aplica la referencia de presión 0kPa, y para ello se utiliza el tapón rojo que se puede ver en la Imagen 42. Es decir, se quita este tapón, dejando así la presión atmosférica y se les da el valor 0 en los pistones (acción que puede realizarse del teclado de los pistones mismos o con ayuda del programa de ordenador).



Imagen 42: Tapón que se debe destapar en el equipo triaxial para referenciar el valor de presión 0 kPa.

Una vez realizado esto y con ayuda del programa de ordenador se debe saturar la muestra dándole una presión de cola, en este caso, de valor teórico 10KPa. La presión de confinamiento aplicada ha sido de 30kPa. Se debe dejar saturar la muestra durante 24 horas, comprobando que el caudal de agua que sale por el extremo superior es igual al caudal de entrada en la base de la probeta

Después de este tiempo la muestra ha sido sacada del equipo triaxial y montada en la columna resonante para poder así ensayarla.

6. ENSAYO DE LA PROBETA EN EL EQUIPO DE COLUMNA RESONANTE

Una vez montada la probeta en la columna resonante y consolidada se realiza el ensayo. Para ello, en primer lugar se deben encender todos los equipos, Imagen 43. Para variar la potencia de la señal aplicada a las bobinas, se ha jugado con la amplitud y la atenuación mediante el generador de pulso, cambiando estos dos parámetros y tomando datos al respecto. En el osciloscopio, por una parte, se puede ver la forma de las ondas sinusoidales (Imagen 44), donde la onda azul corresponde al valor de la onda de excitación y la onda amarilla corresponde a la respuesta.

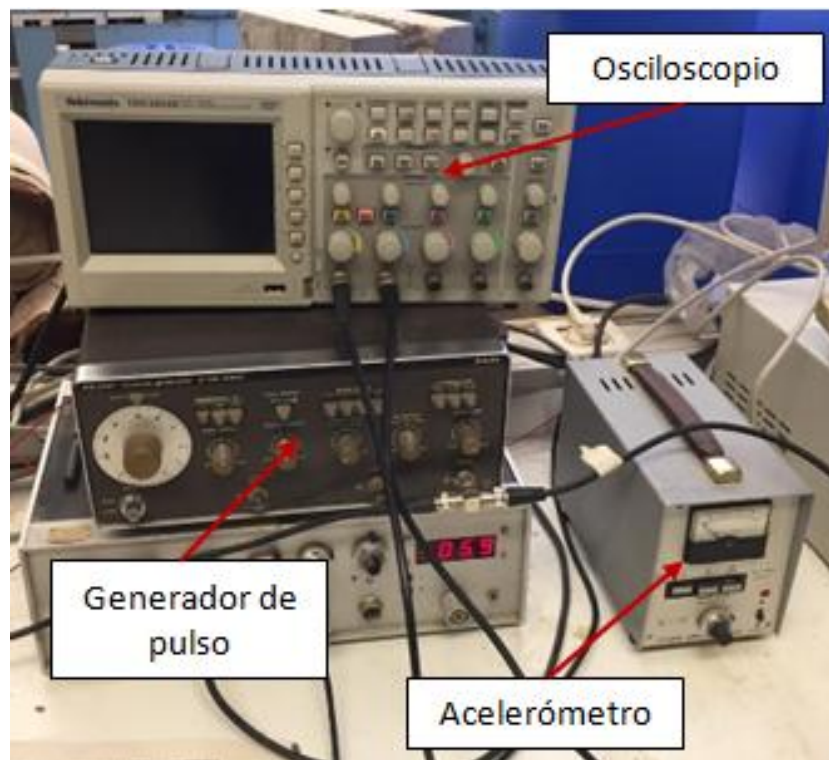


Imagen 43: Equipos que se conectan a la columna resonante para poder realizar el ensayo.

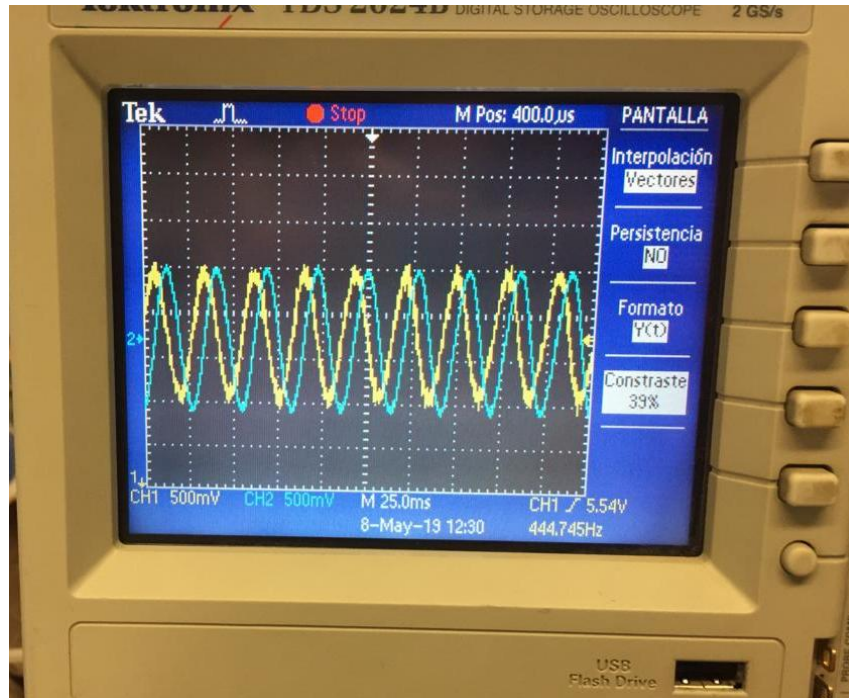


Imagen 44: Ondas sinusoidales, en azul la onda de excitación y en amarillo la onda de respuesta.

Se debe encontrar el estado de resonancia, lo cual supone un desfase de 90° entre las dos ondas (la onda de excitación y la onda de respuesta) y para ello se debe ver el gráfico del osciloscopio en formato (X, Y), donde se podrá apreciar una elipse. Los ejes que definen dicha elipse, se tienen que alinear de tal forma que estén perfectamente colocadas en los ejes X, Y y ese será el punto donde se tiene la resonancia, tal y como puede verse en la Imagen 45. Para alinear la elipse se cambia la frecuencia de excitación hasta que se consiga el desfase de 90° , utilizando el mando circular que se ve representado en la Imagen 45, del equipo generador de pulso.

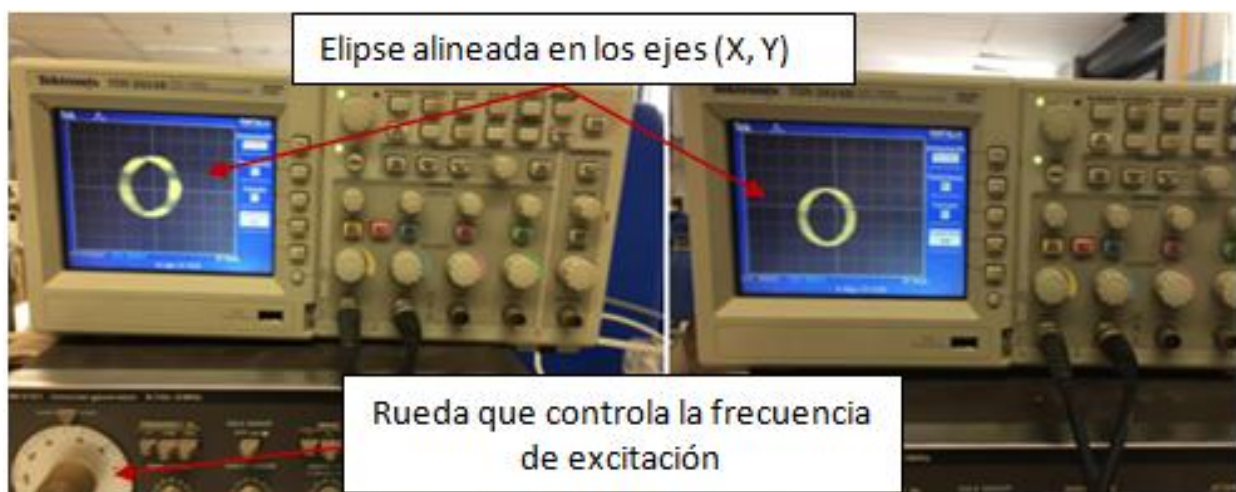


Imagen 45: Situación de resonancia, ejes del elipse perfectamente alineados con los ejes X, Y.

Este estado de resonancia se tiene que tener en cuenta en cada valor de amplitud y atenuación que se ensaye para cada muestra. A continuación, se deben tomar las medidas de los valores pico (Vpp) tanto de la excitación como de la respuesta y de la frecuencia de la resonancia (f_r), que se miden tal y como se ve en la Imagen 46. Para medir estos valores el equipo de oscilómetro consta de unos cursores que se mueven y representan los valores pico-pico en Voltios (V) y el valor de la frecuencia en Hertz (Hz). Para poder tomar los datos el osciloscopio tiene una función que permite congelar la imagen, para que así las ondas no se muevan mientras se miden los valores.

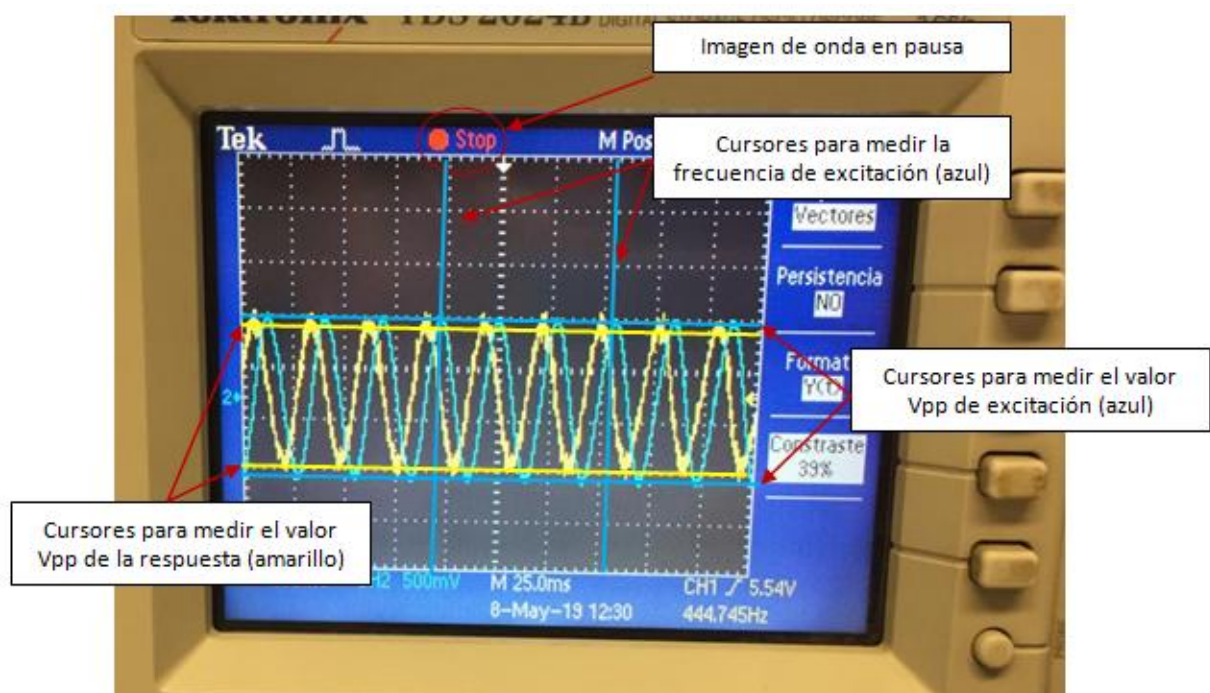


Imagen 46: Imagen congelada para toma de mediciones mediante cursores de los valores Vpp y f_r .

Se vuelve a poner la imagen en marcha para que de esta forma se pueda parar la excitación y poder ver como disminuyen las crestas de la onda debido al amortiguamiento del suelo, teniendo así una onda como la de la Imagen 47. La onda que se tiene en cuenta para medir dicha disminución corresponde a la onda de la respuesta, es decir, la que se representa en color amarillo. Se congela la imagen una vez más, y esta vez se toman datos de las 10 amplitudes que van disminuyendo desde la amplitud de origen. Teniendo en cuenta la pendiente que se crea con dicha disminución de amplitudes, se ha calculado el factor de amortiguamiento.

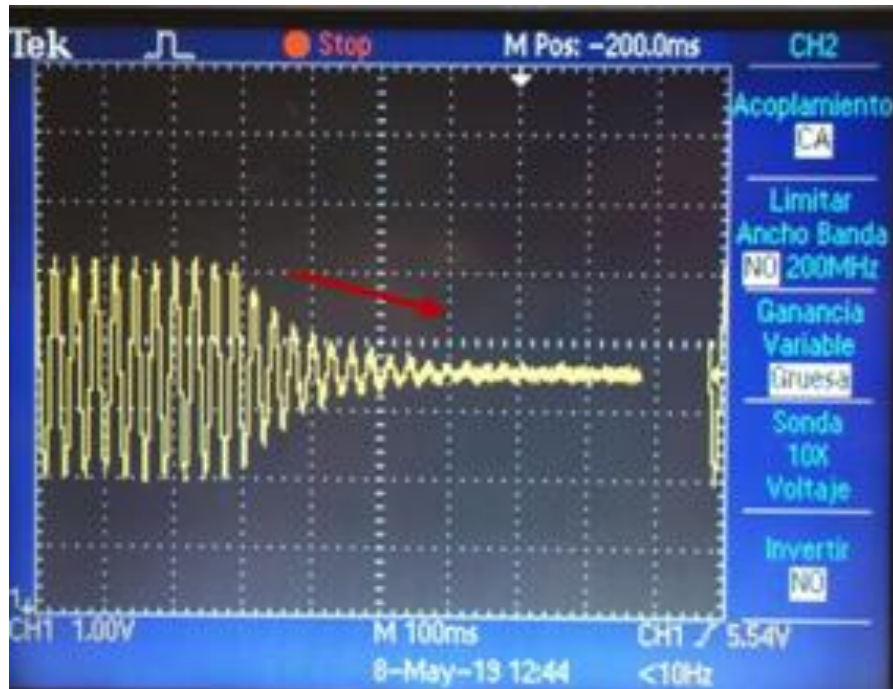


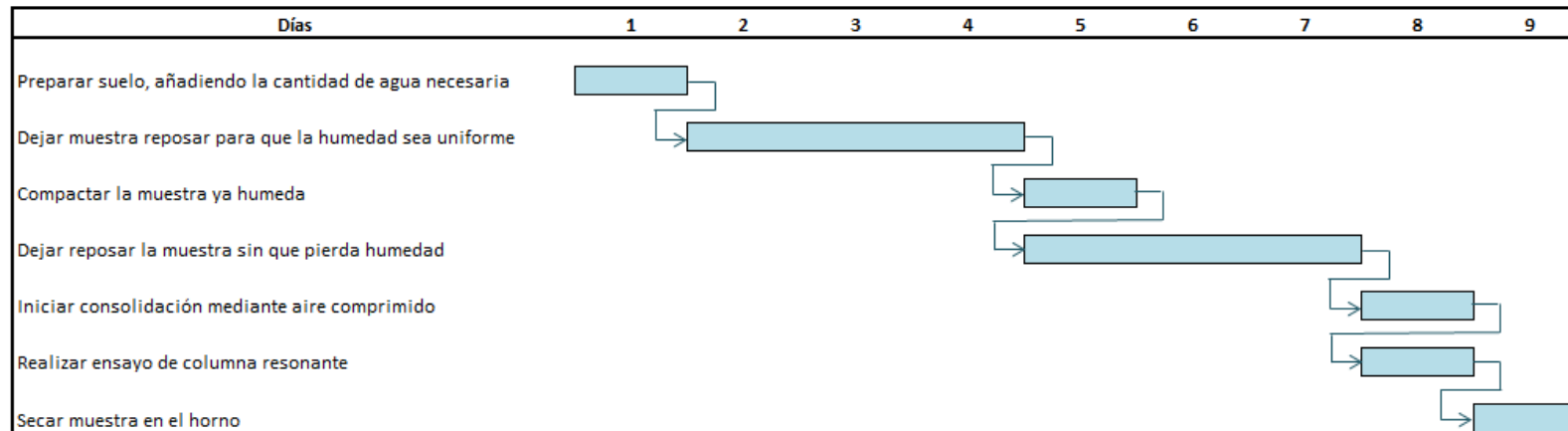
Imagen 47: Onda de respuesta en el momento en el que se para la excitación cíclica.

Este procedimiento se repite para distintas amplitudes y atenuaciones y en cuanto se vaya aumentando la deformación, más claro se verán tanto la elipse como la bajada de las crestas. Esto se debe a que con desplazamientos muy pequeños el ruido eléctrico de las señales es de la misma magnitud de las propias señales a medir. Con estos datos se ha procedido a graficar el módulo de corte G , y el factor de amortiguamiento D , respecto a la deformación de corte γ .

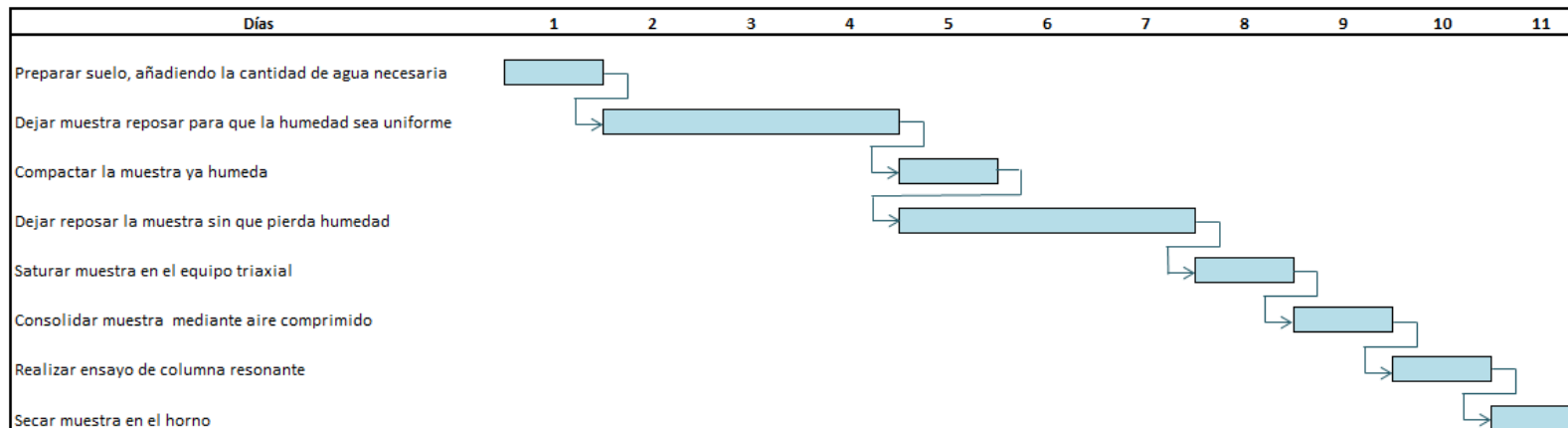
7. CRONOGRAMA DE TRABAJOS DE LABORATORIO

A continuación se muestran los cronogramas seguidos en los ensayos con las muestras no saturadas y con la muestra saturada.

- Muestras con cierta humedad definida:



- Muestras con cierta humedad definida y saturadas mediante el equipo triaxial:



8. RESULTADOS

En este apartado, se muestran los resultados que se han obtenido en los ensayos realizados en laboratorio y sus respectivos cálculos realizados. El análisis de estos se realiza en el siguiente apartado: “9. Análisis de los resultados”.

8.1. HUMEDADES DE LAS PROBETAS

En primer lugar, hay que mencionar que los cálculos se realizan teniendo en cuenta la humedad real de las muestras.

Para ello, se mide el peso de la muestra húmeda y después de ensayarla se coloca en el horno durante un mínimo de 24 horas, para volver a pesar el peso de la muestra seca.

De esta forma se obtiene la humedad real que tiene el suelo, tal y como puede verse en la Tabla 8.

Muestra	Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	Humedad teórica (%)	Humedad real (%)
1	159,09	138,04	15	13,23
2	152,05	136,62	10	10,15
3	167,15	134,87	20	19,31
4	162,03	138,41	15 (sat)	14,58
5	147,32	139,04	5	5,62

Tabla 8: Cálculo de humedades reales de las muestras ensayadas, teniendo en cuenta peso húmedo y peso seco.

8.2. PERMEABILIDAD EN LA MUESTRA SATURADA

En la muestra que se ha saturado, se obtiene la permeabilidad K del suelo utilizando el equipo triaxial y mediante los siguientes parámetros:

- La presión de cola (con un valor teórico de 10KPa)
- El tiempo (cada 10 s)
- El volumen de agua que entra a la probeta

Teniendo estos valores, se obtiene la curva de Volumen (mm^3) vs Tiempo (s) que se ve representado en el Gráfico 6. De esta forma, se observa que llega un punto en el cual dicha curva se convierte en lineal. Con esta pendiente, se calcula el valor del caudal que Q que pasa por la muestra, ya que se sabe qué (fórmula 14);

$$Q = \frac{V}{t} \quad (14)$$

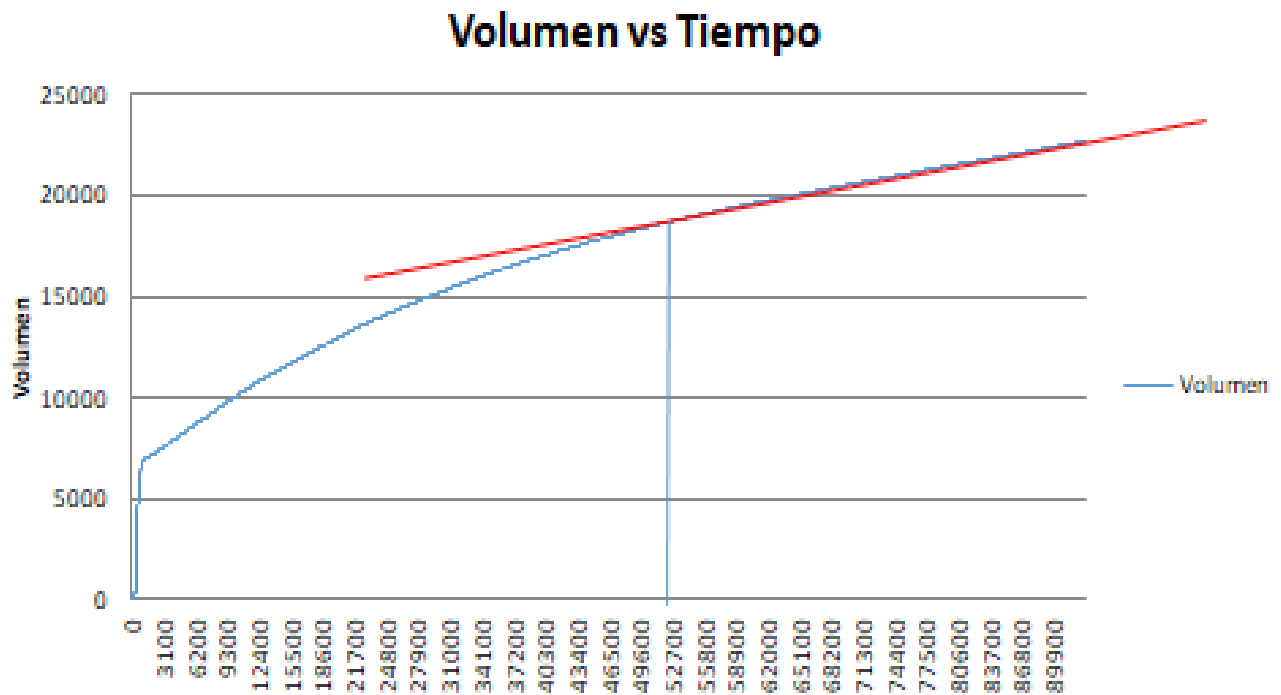


Gráfico 6: Volumen respecto al tiempo durante la saturación de la muestra (con humedad inicial del 15%).

Una vez se tiene el valor Q , se obtiene el valor de la gradiente i . Para ello, se tiene en cuenta la diferencia de la presión de cola en la parte inferior y la parte superior de la muestra partida por la altura de la muestra, tal y como se ha visto en la fórmula número 15 y se ha representado en la Imagen 48:

$$i = \frac{H_3 - H_1}{h} \quad (15)$$

Donde,

i = gradiente hidráulico (adimensional)

H_3 = Presión de cola en la parte inferior de la muestra (mca)

H_1 = Presión de cola en la parte superior de la muestra (mca)

h = Altura de la muestra (0.076m)

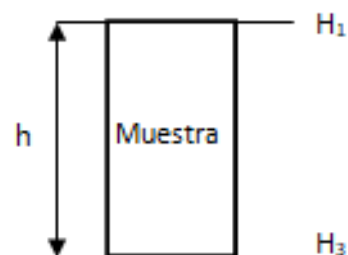


Imagen 48: Definición gráfica de la muestra y las presiones que esta tiene.

El valor de H_3 que se considera para dicho cálculo corresponde a la media del valor de presión de cola que ha medido el equipo triaxial durante 24 horas, correspondiente a 9 KPa.

De esta forma ya se ha podido calcular el valor de la permeabilidad con la fórmula 16.

$$Q = k i A \quad (16)$$

$$k = \frac{Q}{iA} \quad (26)$$

Donde;

k = Permeabilidad

Q = Caudal

i = Gradiente hidraulico

A = Area de la muestra

Se ha obtenido un resultado para el valor de permeabilidad de la arcilla limosa del llano de Barcelona de $1,0 \cdot 10^{-8}$ m/s. Este valor se considera razonable dado el tipo de suelo ensayado.

8.3. RESULTADOS QUE SE OBTIENEN EN LA COLUMNA RESONANTE PARA TODAS LAS MUESTRAS

En este punto se muestran los resultados que se obtienen mediante los datos que se han recogido en laboratorio, teniendo como ejemplo la muestra número 1, con una humedad teórica de 15% y con las siguientes características, mostradas en la Tabla 9:

Muestra	1
Densidad seca (Mg/m^3)	1,63
Humedad (%)	13,23
J_m (kgm^2)	0,0026
D (m)	0,038
L(m)	0,076
Kacc [$(\text{m/s}^2)/V$]	6,5
Ra (m)	0,051
Densidad (kg/m^3)	1845,674
Volumen (m^3)	8,62E-05
Masa (kg)	0,159
J_s (kgm^2)	2,87E-05
K (MPa s^2)	0,038
k_{def} (1/V)	0,269

Tabla 9: Características de la muestra 1 (humedad 15%).

Dichos parámetros se han calculado tal y como se ha explicado en el apartado 4. de este mismo documento.

Es importante volver a recalcar que la humedad que se tiene, en este caso el 13,23%, es la humedad real de la muestra ensayada, en este caso muestra número 1.

Los resultados que se obtienen con la columna resonante corresponden a los valores de;

- V_{pp} de excitación
- V_{pp} de respuesta
- f_r de excitación (en resonancia)
- Los valores de la amplitud al parar la carga ciclica (A_n)

Estos valores corresponden a los medidos en laboratorio. Para ello se ha utilizado una plantilla, válida para todas las muestras, la cual se puede ver en el Anexo A.

Para obtener el factor de amortiguamiento, teniendo en cuenta los valores de las amplitudes de la onda que tienen una pendiente descendiente al dejar de excitar cíclicamente la muestra, se realiza una aproximación entre los valores medidos en laboratorio (puntos en color rojo), ajuste logarítmico (línea azul) y ajuste lineal (línea verde). A partir de estos ajustes se obtiene el decremento logarítmico, como puede verse en el siguiente ejemplo, Gráfico 7:

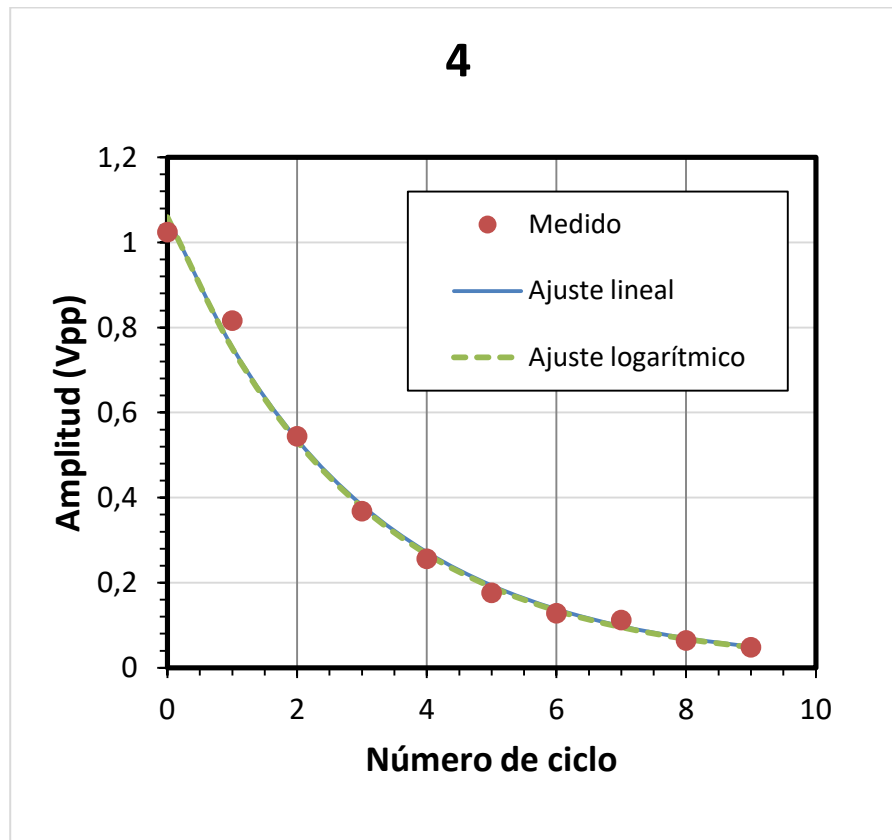


Gráfico 7: Amplitudes descendientes vs Número de ciclos, al dejar de excitar la muestra número 1, con humedad 15%.

- Ajuste logaritmico:

En el ajuste logaritmico se calcula el valor logaritmico neperiano de los valores de las amplitudes A_n descendientes que se obtienen en laboratorio, $\ln(A_n)$. Se obtienen valores negativos (puede verse en el apartado Anexo B).

Y de esta forma y teniendo en cuenta dichos valores, se cálcula el valor correspondiente a A_0 , es decir la amplitud inicial del ajuste logaritmico. Este se cálcula con el valor exponencial del punto de intersección con el eje Y. El valor A_0 , es el valor equivalente a la cresta más alta al parar la excitación ciclica, tal y como se ve representada en la siguiente Imagen 49.

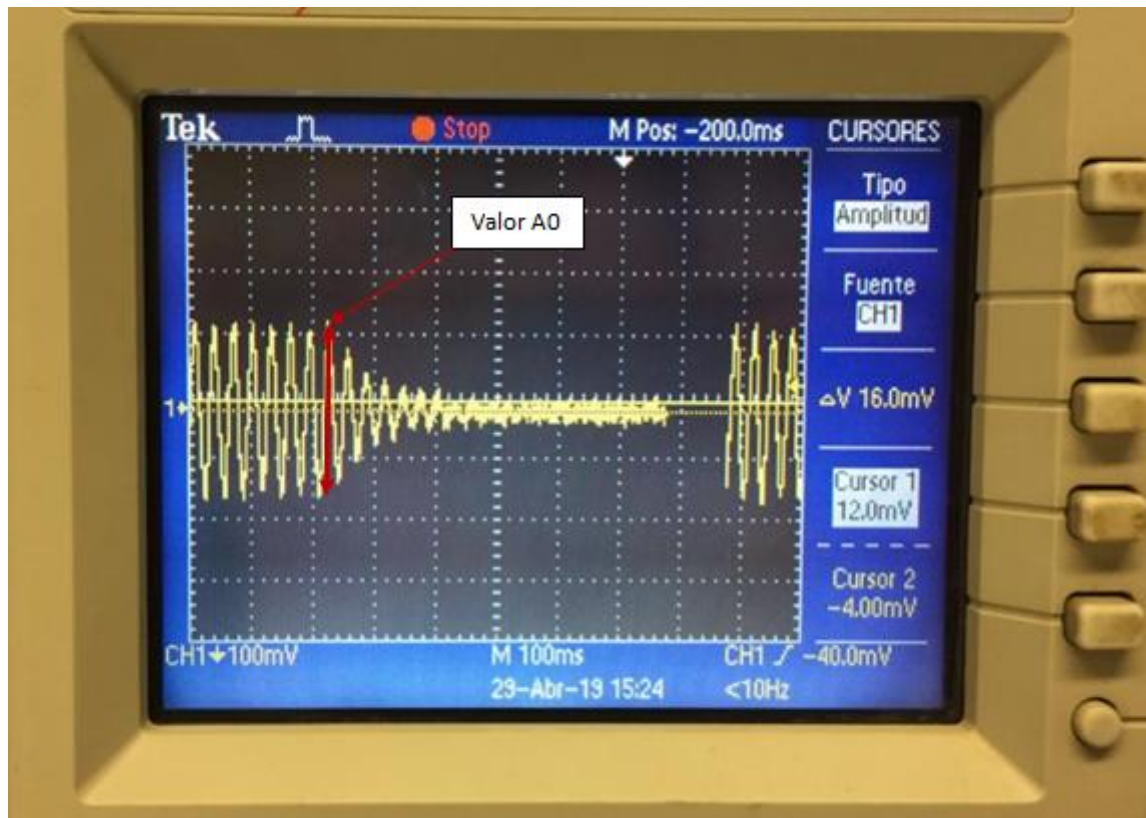


Imagen 49: Valor A_0 , cresta más alta de la onda al dejar de excitar la muestra.

Una vez hecho esto, se calcula la pendiente μ que corresponde a relación lineal entre los valores de logaritmo neperiano de las amplitudes medidas y el número de ciclos

De esta forma, para obtener el valor del factor de amortiguamiento de cada ciclo, se calcula;

$$D = \frac{\mu}{2\pi} \quad (27)$$

Así, se obtiene el ajuste logarítmico, que se ve representado en el gráfico en color verde.

- Ajuste líneal:

En este ajuste, se tiene en cuenta la misma fórmula (27), para poder llegar al valor del factor de amortiguamiento D . Pero para llegar a ello se debe realizar lo siguiente:

Para cada amplitud A_n , se calcula lo siguiente:

$$A_n = A_0 \cdot e^{(-\mu n)} \quad (28)$$

Donde,

A_n = Amplitud en el ciclo n

A_0 = Amplitud inicial

μ = Decremento logarítmico

n = Número de ciclo

Tanto A_0 , como μ se obtienen haciendo que los valores de A_n calculados con la ecuación (28) se aproximen lo más posible a los valores de A_n medidos en el ensayo. Para obtener esta aproximación, se utiliza la función "SOLVER" en Excel, para así minimizar la diferencia entre la pendiente aproximada y los valores que se obtienen en laboratorio, teniendo los parametros mencionados como variables.

En este ajuste, se minimizará la suma de las diferencias al cuadrado, cada una de las cuales consiste en el cálculo de la diferencia entre A_n calculada con la fórmula anterior y el valor de A_n medido en laboratorio, al cuadrado, es decir:

$$A_n(\text{Dif. Al cuadrado}) = [A_n(\text{Calculada}) - A_n(\text{Laboratorio})]^2 \quad (29)$$

Todo esto puede verse en el apartado Anexo B, en el punto de ajuste lineal, correspondiente al ejemplo de muestra 1, con humedad 15%, que se ha utilizado para poder explicar los resultados.

A continuación, y teniendo en cuenta lo aclarado en el punto "4.2.1. Obtención del Módulo de corte G ", se dibuja el gráfico Modulo de corte G vs Deformación de corte;

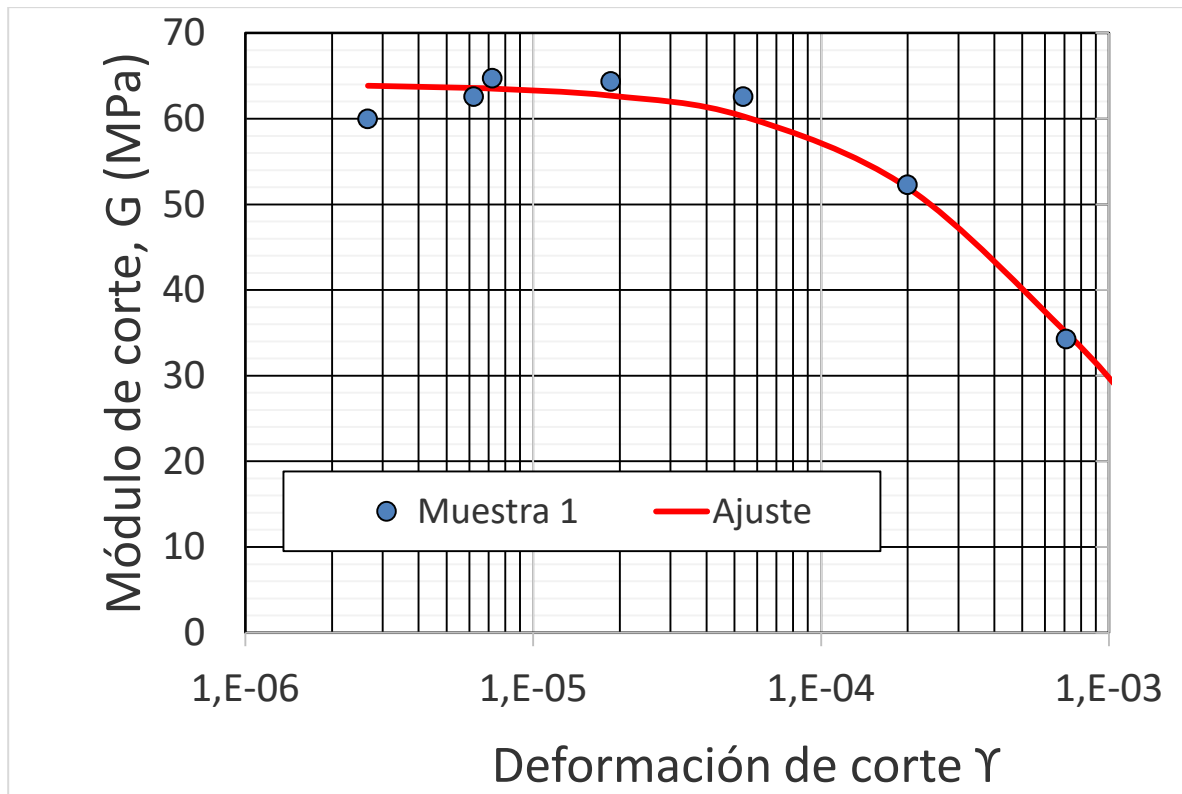


Gráfico 8: Módulo de corte G vs deformación de corte γ , con los valores medidos en laboratorio (puntos azules) y el correspondiente ajuste (en rojo), para la muestra con humedad 15%.

Para el ajuste mostrado en el Gráfico 8, se han basado los cálculos en las fórmulas mencionadas anteriormente:

$$G(\gamma) = \frac{G_0}{1 + 0,385 \frac{\gamma}{\gamma_{0,7}}} \quad (30)$$

$$\frac{G(0,7)}{G_0} = 0,722 \quad (31)$$

$$\gamma_r = \frac{\gamma_{0,7}}{0,385} \quad (32)$$

En este caso, también se ha utilizado la función “SOLVER” para minimizar la suma de la diferencia al cuadrado, en este caso de los valores del módulo de corte G , calculado en laboratorio y calculado de forma analítica con ayuda de las anteriores fórmulas. Los parámetros variables para utilizar esta función, corresponden al parámetro G_0 y al parámetro $\gamma_{0,7}$. Esto puede verse en el apartado Anexo B, en el punto de módulo de corte G vs deformación de corte γ .

Con esta minimización se consigue ajustar la curva que se ve representada en el Gráfico 8, a los puntos

medidos en laboratorio y representados en azul.

También se obtiene el gráfico correspondiente al factor de amortiguamiento D vs deformación de corte γ . Para ello y retrocediendo al apartado “4.2.2. Obtención de factor de amortiguamiento”, se utilizan tres ajustes distintos y por tanto se obtienen tres gráficos distintos. En todos ellos se utiliza la función “SOLVER” para minimizar la suma de la diferencia al cuadrado entre el factor de amortiguamiento D obtenido en laboratorio y calculado.

- Poucell (2016)

$$D = D_0 + D_{\max} \left[2 \left[1 + \frac{1}{\gamma_r} \right] \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}\right)}{\frac{\gamma}{\gamma_r}} \right] - 1 \right] \quad (9)$$

Donde, los parámetros variables en la utilización de la función “SOLVER” son: D_0 y D_{\max} . Esto se puede ver en el apartado Anexo B, en el punto llamado “Poucell (2016)”.

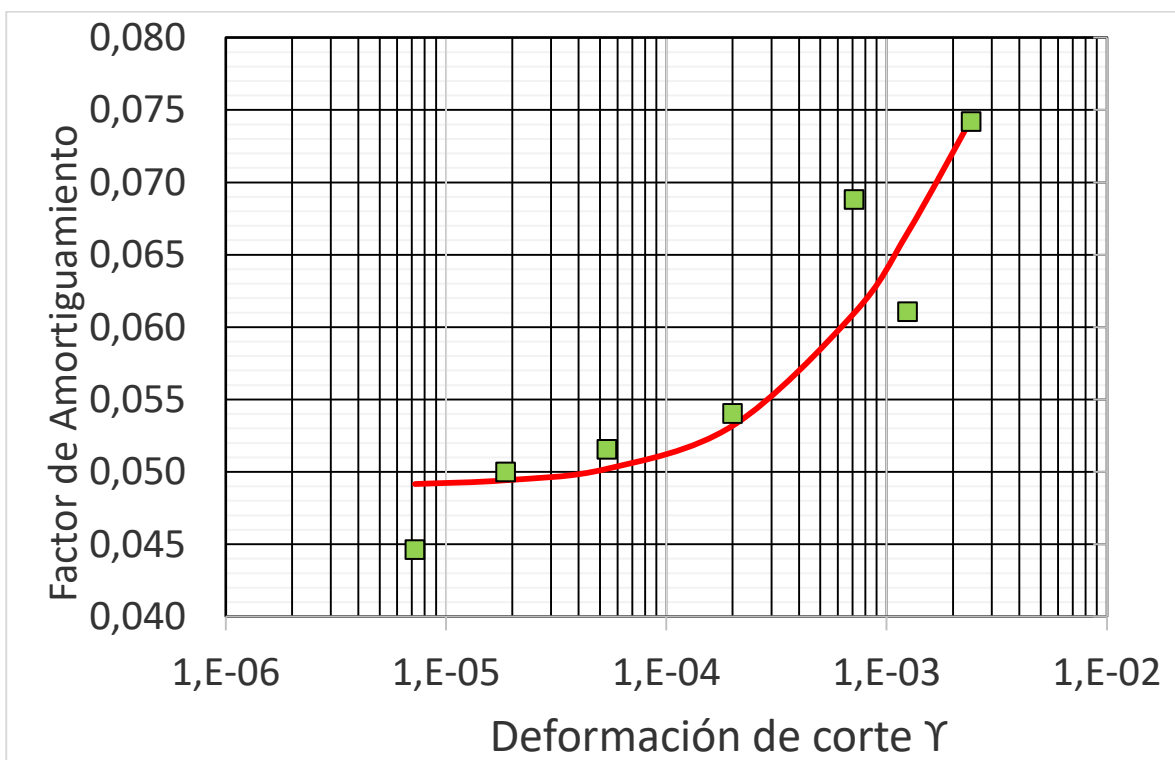


Gráfico 9: Factor de amortiguamiento D vs deformación de corte γ , puntos medidos en laboratorio y el ajuste correspondiente a Poucell (2016).

Esta aproximación es la más exacta de las 3 analizadas, ya que se ha visto en todos los casos que es la que mejor se acopla a los resultados medidos.

- Ratio de amortiguamiento del material (Assimaki, Kaurel, Whittle, 2000):

$$D(\gamma_r) = \frac{2}{\pi} [1 - G(\gamma_r) \left(\frac{1}{6} C C_1 C_2 \tau_r^2 + \frac{1}{3} C (C_1 + C_2) \tau_r + C \right)] \quad (10)$$

Donde, los parametros variables en la utilización de la función “SOLVER” son: C, C1, C2 y Dmax. Esto se puede ver en el apartado Anexo B, en el punto llamado “Ratio de amortiguamiento del material”.

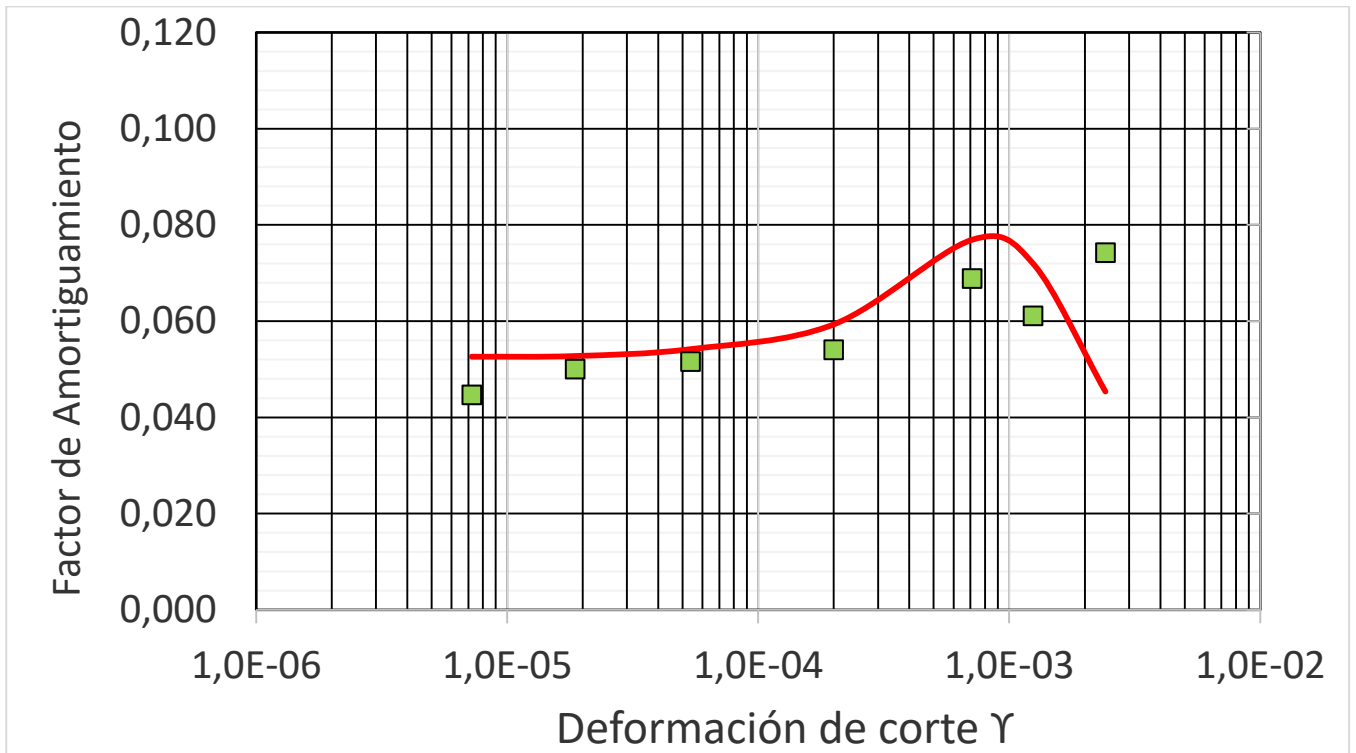


Gráfico 10: Factor de amortiguamiento D vs deformación de corte γ , puntos medidos en laboratorio y el ajuste correspondiente al ratio de amortiguamiento del material (Assimaki, Kaurel, Whittle, 2000).

En este caso, ya que se calcula el valor de la Tensión de corte τ , de la siguiente forma;

$$\tau = \gamma \cdot G \quad (33)$$

Se obtiene también el grafico correspondiente a Tensión de corte τ vs Deformación de corte γ (Gráfico 11).

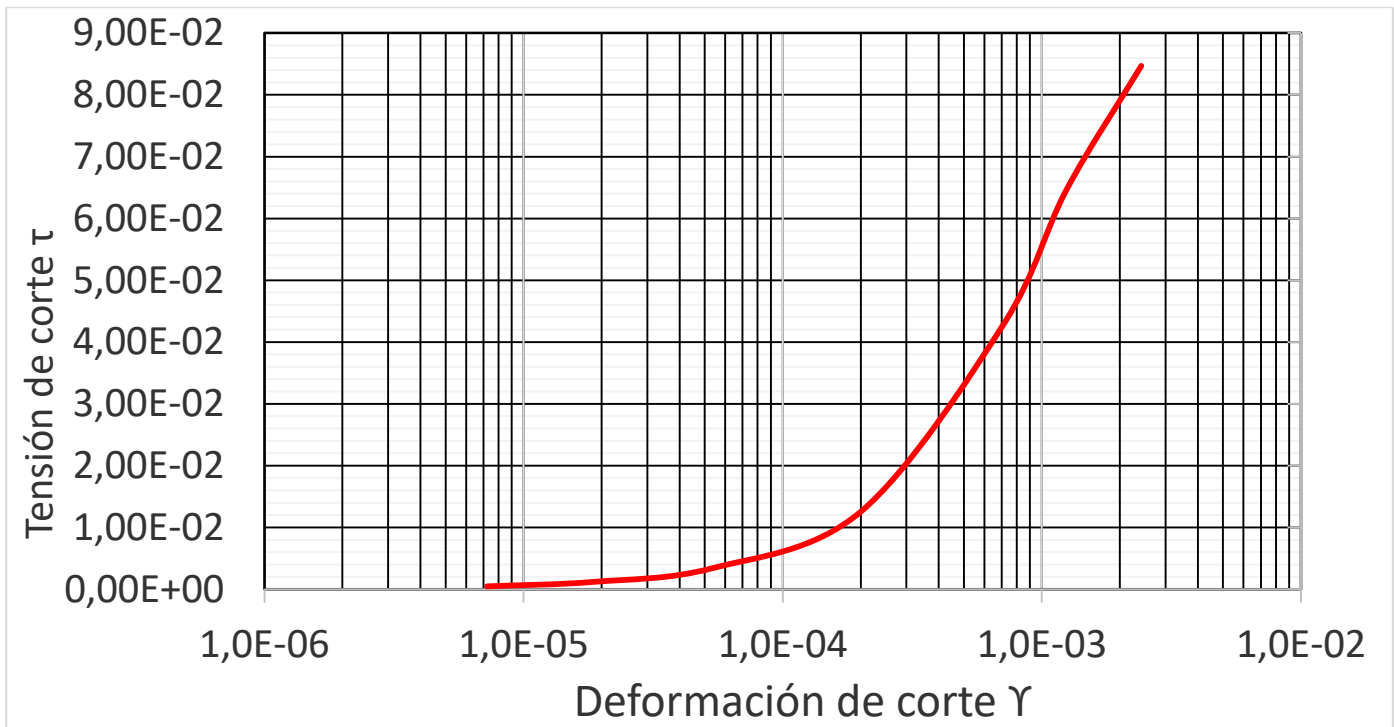


Gráfico 11: Tensión de corte τ vs deformación de corte γ , obtenido mediante el ajuste de ratio de amortiguamiento del material (Assimaki, Kaurel, Whittle, 2000)

- Amortiguamiento histerético en modelos de pequeñas deformaciones (Brinkgreve, Kappert, Bonnier, 2007):

$$D = E_{min} + \frac{ED}{4\pi ES} \quad (11)$$

$$E_D = \frac{4 G_0 \gamma_{0,7}}{a} \left(2\gamma_r - \frac{\gamma_r}{1 + \frac{\gamma_{0,7}}{a\gamma_r}} - \frac{2 \gamma_{0,7}}{a} \ln\left(1 + \frac{a\gamma_r}{\gamma_{0,7}}\right) \right) \quad (34)$$

$$E_S = \frac{1}{2} G_S \gamma_r^2 = \frac{G_0 \gamma_r^2}{2 + \frac{2a\gamma_r}{\gamma_{0,7}}} \quad (35)$$

Donde, los parametros variables en la utilización de la función “SOLVER” son: a y D_{min} . Esto se puede ver en el apartado Anexo B, en el punto llamado “Amortiguamiento histerético en modelos de pequeñas deformaciones”.

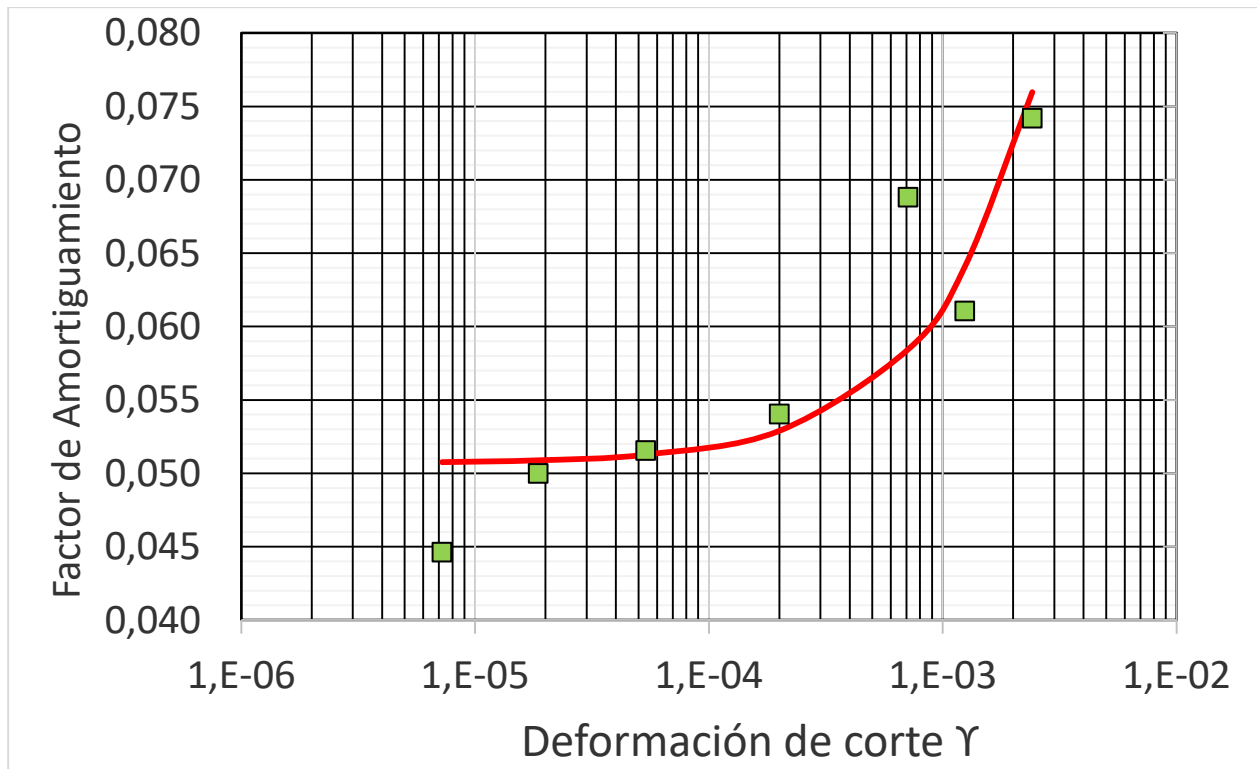


Gráfico 12: Factor de amortiguamiento D vs deformación de corte γ , puntos medidos en laboratorio y el ajuste correspondiente al amortiguamiento histerético en modelos de pequeñas deformaciones (Brinkgreve, Kappert, Bonnier, 2007).

9. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Para analizar los resultados obtenidos, se han comparado los resultados de todas las muestras ensayadas entre ellas, para que de esta forma se pueda ver el efecto que tiene el grado de saturación de las muestras respecto a su comportamiento ante las cargas cíclicas y en consecuencia, de amortiguamiento.

A continuación, se muestran una serie de gráficos, comparando distintos parámetros de las muestras que se han ido analizando y explicando de una en una:

9.1.EFECTO DE LA DEFORMACIÓN LA SATURACIÓN EN LA RIGIDEZ A CORTE

En el siguiente Gráfico 13, se ve representado el valor del módulo de corte G respecto a la deformación de corte γ , para las muestras de distintos grados de saturación. En dicho gráfico, se observa que cuando el grado de saturación de la muestra es menor, el módulo de corte es mayor, en comparación a las muestras más saturadas. También se observa que, la pendiente de los valores del módulo de corte disminuye más rápidamente en las muestras con un grado de saturación más bajo.

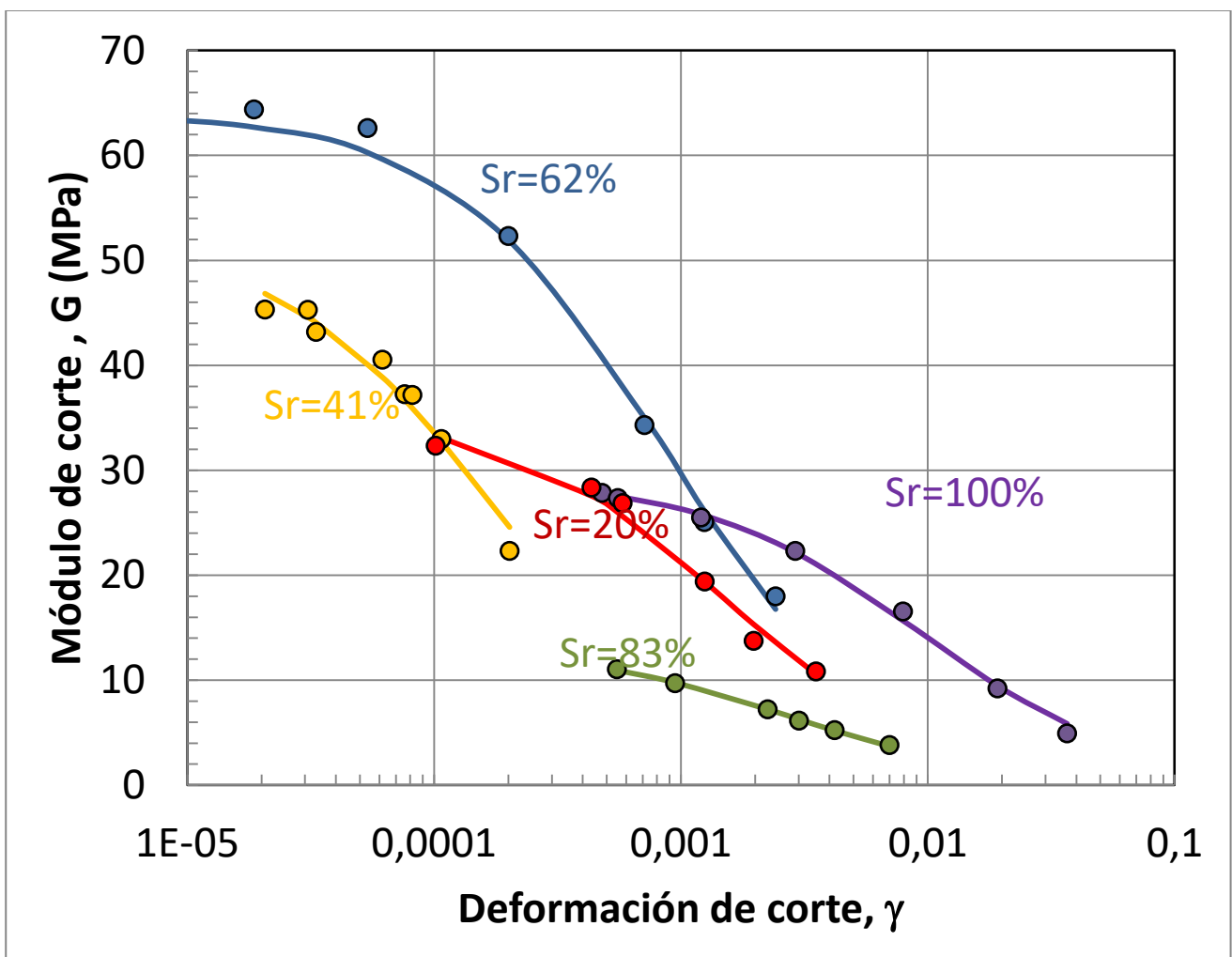


Gráfico 13: Módulo de corte G respecto a la deformación de corte γ de las 5 muestras.

En el Gráfico 14, se muestra el módulo de corte normalizado, respecto al módulo de corte inicial G_0 para cada muestra respecto a la deformación de corte. De manera que las muestras con mayor grado de saturación representan una deformación de corte mayor que las muestras menos saturadas (salvo en el caso de la muestra con el 20% de saturación). Obteniendo entre ellas una pendiente similar, haciendo que se vean prácticamente paralelas.

Haciendo hincapié en el Gráfico 2, puede verse que estas curvas experimentales siguen la misma trayectoria que se detalla en la curva teórica del gráfico mencionado, pudiendo ver, que los resultados experimentales se acoplan de una forma coherente a la teoría.

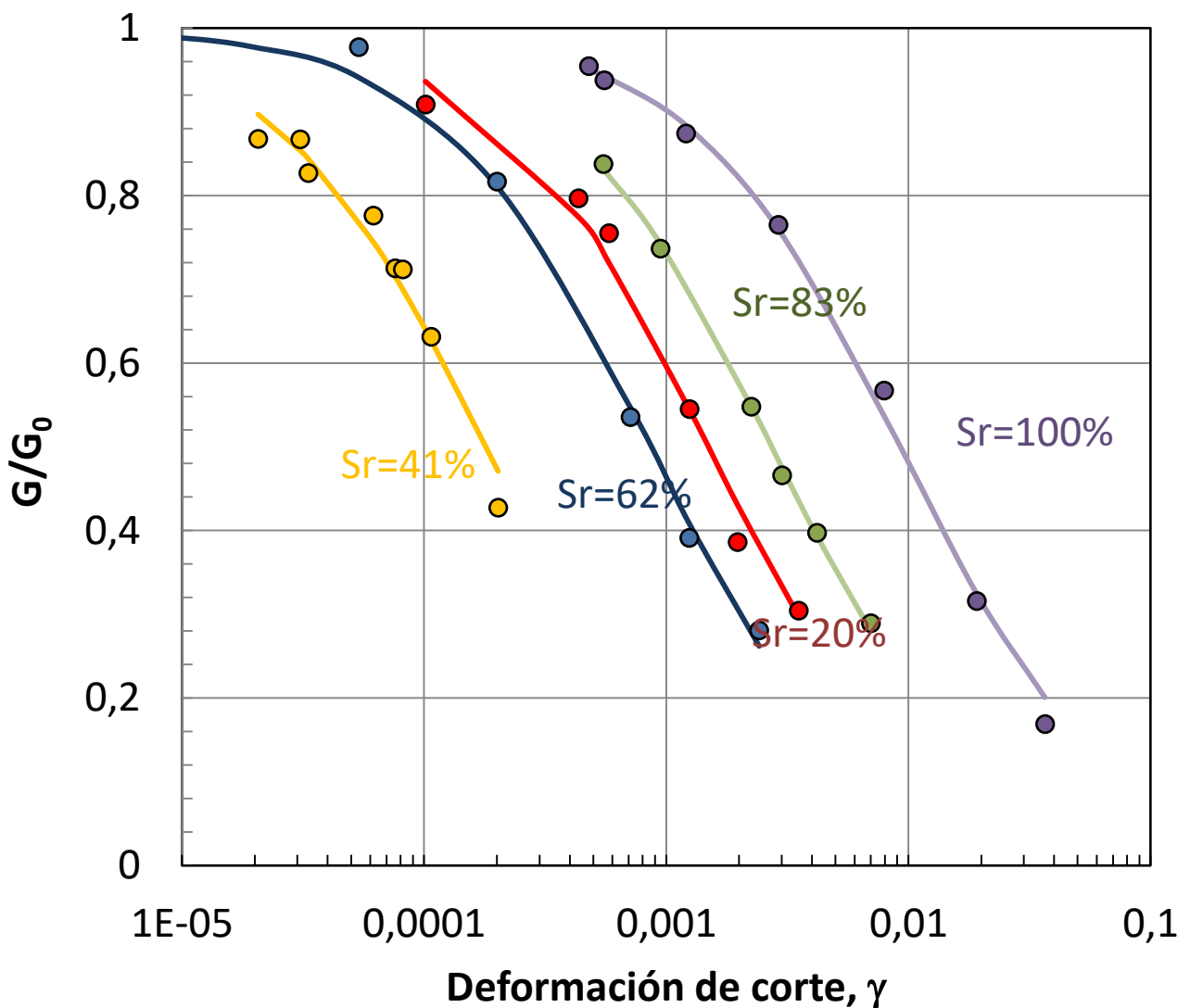


Gráfico 14: Módulo de corte normalizado G/G_0 respecto a deformación de corte γ .

En el Gráfico 15 se ha representado el módulo de corte G respecto al grado de saturación S_r en función de 4 valores distintos de deformación de corte γ . En concreto: $\gamma=10^{-2}$, $\gamma=10^{-3}$, $\gamma=10^{-4}$ y $\gamma=10^{-5}$.

Una vez representados, se analiza que, cuando mayor es el valor de la deformación de corte γ , mayor variación sufre el módulo de corte G , con valores más elevados respectivamente. Es decir, puede verse que cuando $\gamma=10^{-2}$ la variación de módulo de corte G es mínima, en cambio, en los tres valores siguientes el cambio es más brusco. Se observa que para deformaciones pequeñas la mayor rigidez se presenta para grados de saturación del orden del 60%. Sin embargo, cuando las deformaciones se hacen muy grandes, la rigidez máxima se presenta en la muestra saturada.

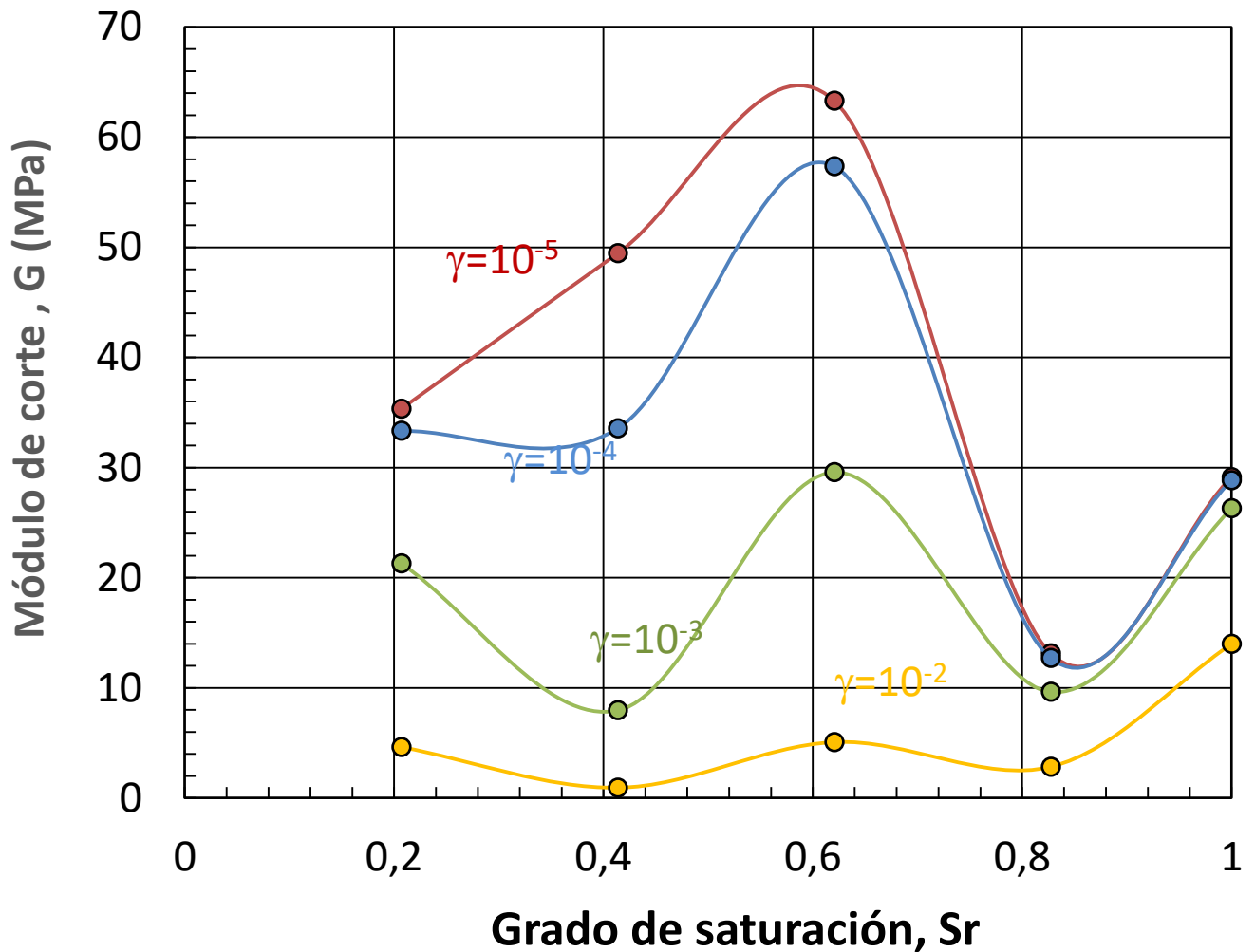


Gráfico 15: Módulo de corte G respecto al grado de saturación S_r , teniendo valores fijos de deformación de corte γ .

9.2. EFECTO DE LA SATURACIÓN EN LOS PARAMETROS DE RIGIDEZ G_0 Y $\gamma_{0.7}$

Puede verse que, en los resultados obtenidos, los valores de la rigidez no se ajustan a una tendencia monótona con la saturación. Dado el limitado número de ensayos disponible es difícil afirmar que la tendencia observada puede generalizarse, ya que un error en uno de los ensayos puede repercutir en la forma de la relación obtenida. Por ejemplo, en la muestra saturada, al ensayarla en un equipo (columna

resonante), pero habiendo sido saturada en un equipo distinto (equipo triaxial), puede haber sido alterada y darse un resultado que no sea exacto.

Tanto el Gráfico 16 y Gráfico 17 son similares, ya que la humedad y el grado de saturación están directamente relacionados para una densidad seca constante.

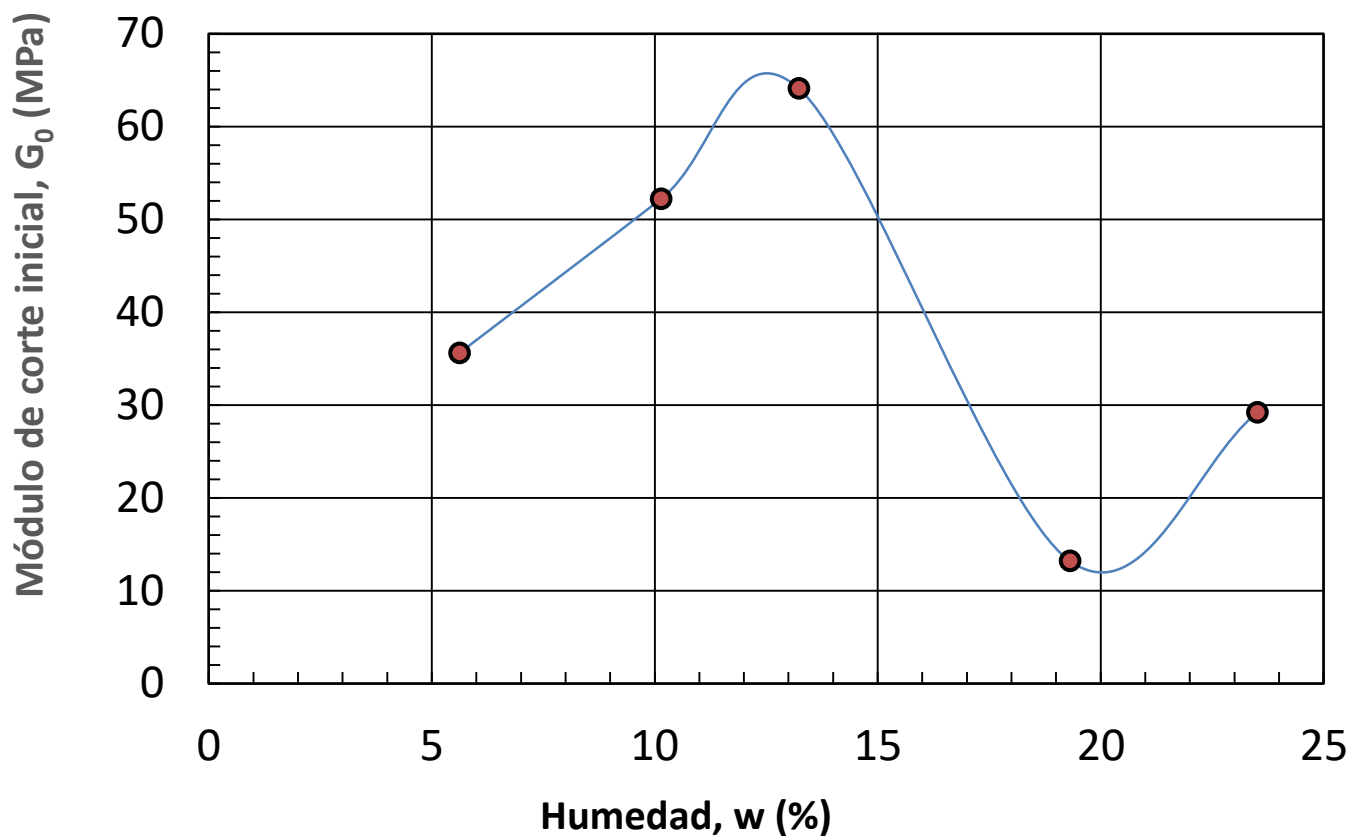


Gráfico 16: Variación del módulo de corte inicial G_0 respecto a la humedad del suelo.

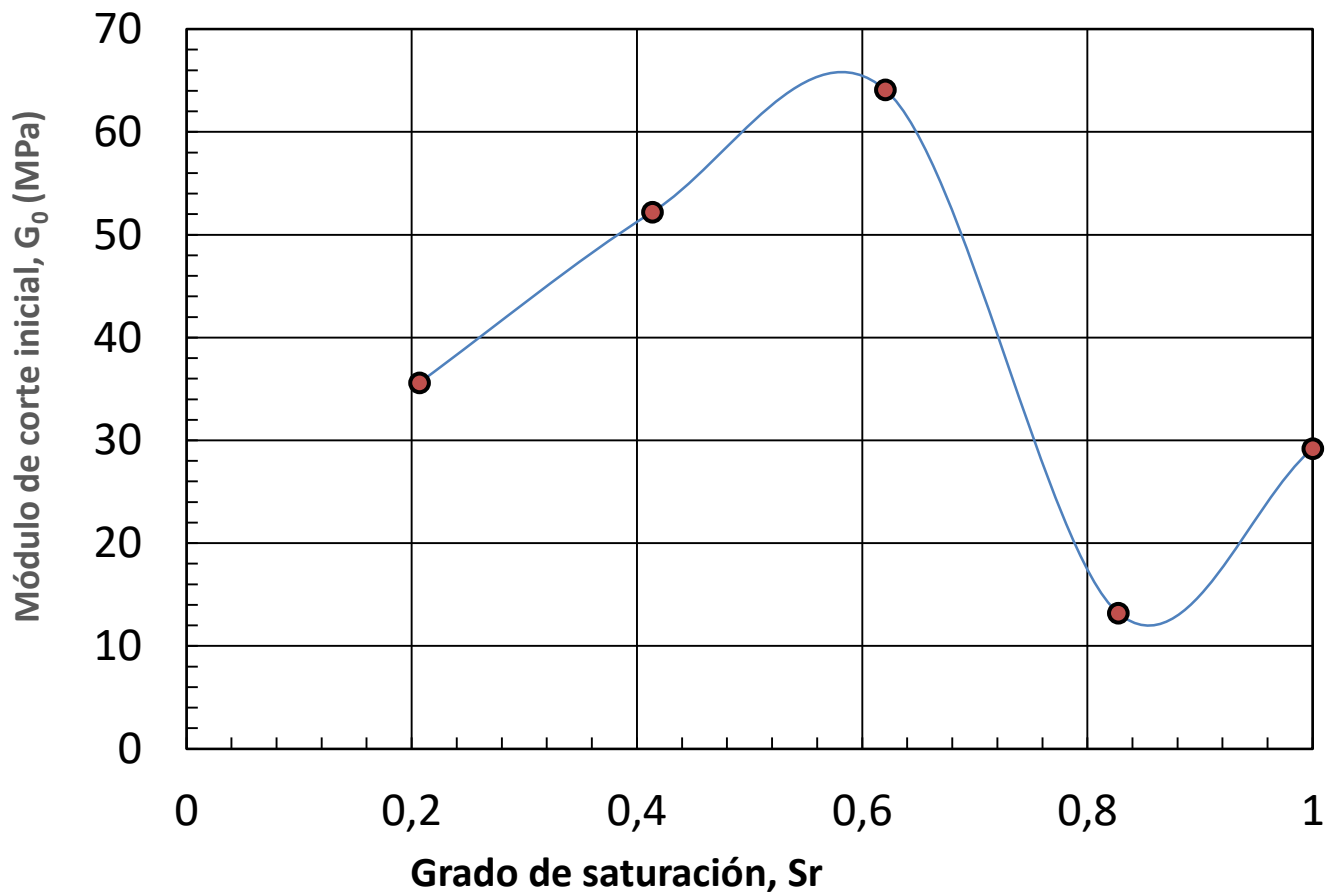


Gráfico 17: Variación del módulo de corte inicial G_0 respecto al grado de saturación del suelo.

En el siguiente Gráfico 18, pueden verse representados, los puntos del valor de la variación de la deformación de corte $\gamma_{0,7}$, donde se aprecia una tendencia parabólica. Puede verse que los valores intermedios de saturación (entre el grado de saturación 0,2 y 0,6) tienen una variación muy pequeña de deformación de referencia, en cambio en los extremos de grado de saturación, este valor aumenta. El valor más pequeño de la deformación de referencia, corresponde al valor de grado de saturación de 40%, que es casi nulo ($7 \cdot 10^{-5}$), siendo este el vértice de la parábola.

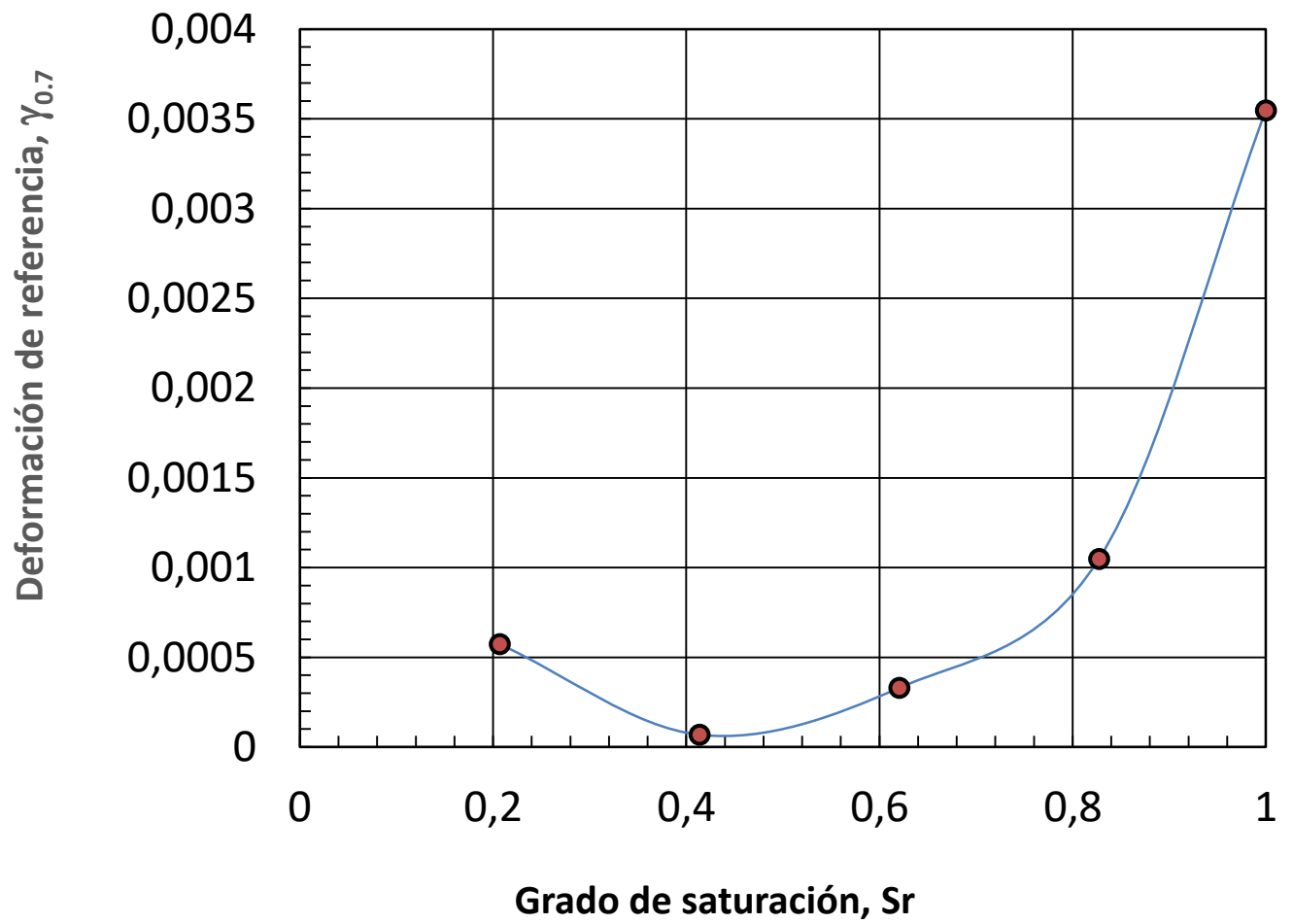


Gráfico 18: Variación de la deformación de referencia $\gamma_{0.7}$ respecto al grado de saturación del suelo.

9.3. EFECTO DE LA DEFORMACIÓN Y DE LA SATURACIÓN EN EL FACTOR DE AMORTIGUAMIENTO

En los siguientes gráficos, Gráfico 19 y Gráfico 20, puede verse representado el factor de amortiguamiento de cada muestra respecto a la deformación de corte. La deformación de corte medida, tiene un rango entre $\gamma=0$ y $\gamma=0,01$.

Debido al procedimiento experimental empleado, donde no se fijan los valores de la deformación de corte, los valores obtenidos del rango de deformación de corte varían para cada muestra. Se ve que, por ejemplo, la muestra con un grado de saturación de 41%, se mueve en un rango muy pequeño de deformación de corte. En cambio, la muestra más saturada llega a valores más altos de deformación de corte.

Dejando esto a un lado, puede destacarse que, salvo para el caso saturado, cuanto mayor es la cantidad de agua de la muestra, mayor es el factor de amortiguamiento. Este valor llega hasta aproximadamente un valor de 0,14.

En el Gráfico 20, puede verse que esta trayectoria se acopla de una forma adecuada a lo explicado anteriormente en el Gráfico 2, siguiendo la tendencia habitual en suelos.

El Gráfico 13, junto al Gráfico 20, hace entender que efectivamente, los resultados obtenidos se acercan a la forma analítica vista en el apartado “4.2. Principios de funcionamiento”.

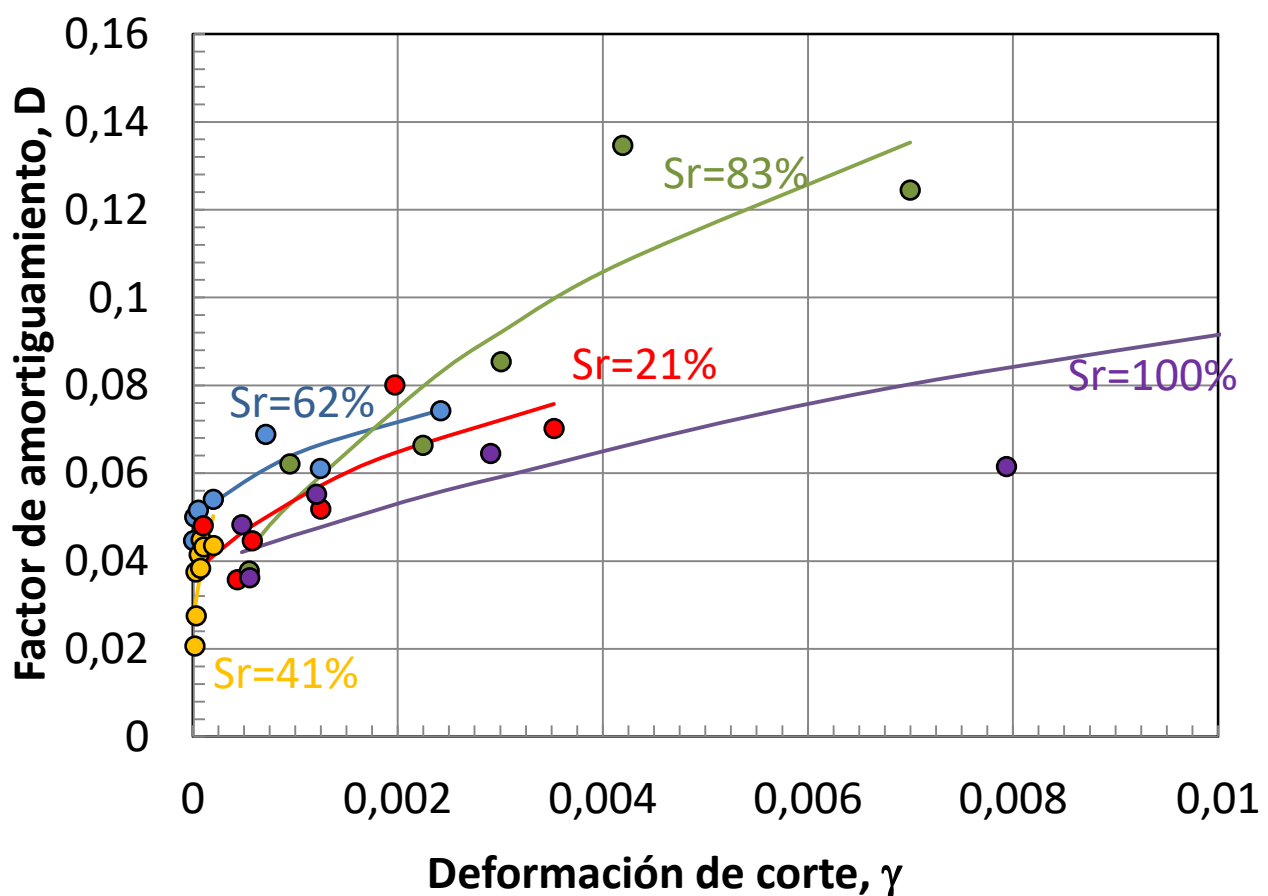


Gráfico 19: Factor de amortiguamiento respecto a la deformación de corte de cada muestra.

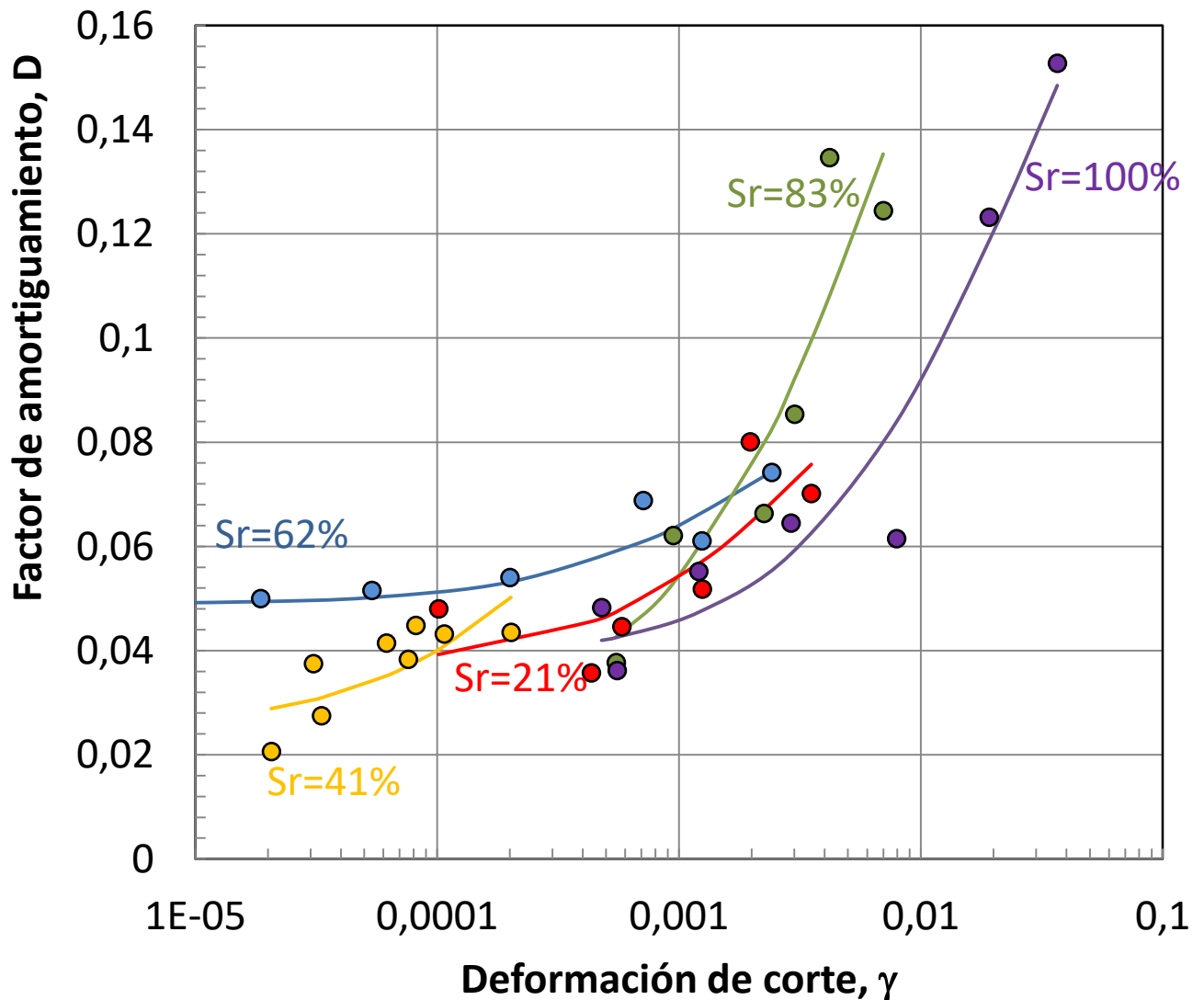


Gráfico 20: Factor de amortiguamiento respecto a la deformación de corte de cada muestra, representada en escala logarítmica.

Para conocer el factor de amortiguamiento correspondiente a una deformación fijada, se han utilizado 3 modelos distintos. Dichos modelos se han mencionado anteriormente en el apartado 8 de “Resultados”.

El modelo 1 (Gráfico 21) corresponde al modelo de Poucell (2016) y es el que mejor ajuste presenta de los tres modelos representados. Es decir, teniendo en cuenta los valores obtenidos en laboratorio y con el modelo analítico, es el que más consigue un mejor ajuste.

El modelo 2 (Gráfico 22) corresponde al modelo de ratio de amortiguamiento del material (Assimaki, Kaurel, Whittle, 2000) (Gráfico 22) y el modelo 3 (Gráfico 23) al amortiguamiento histerético en modelos de pequeñas deformaciones (Brinkgreve, Kappert, Bonnier, 2017).

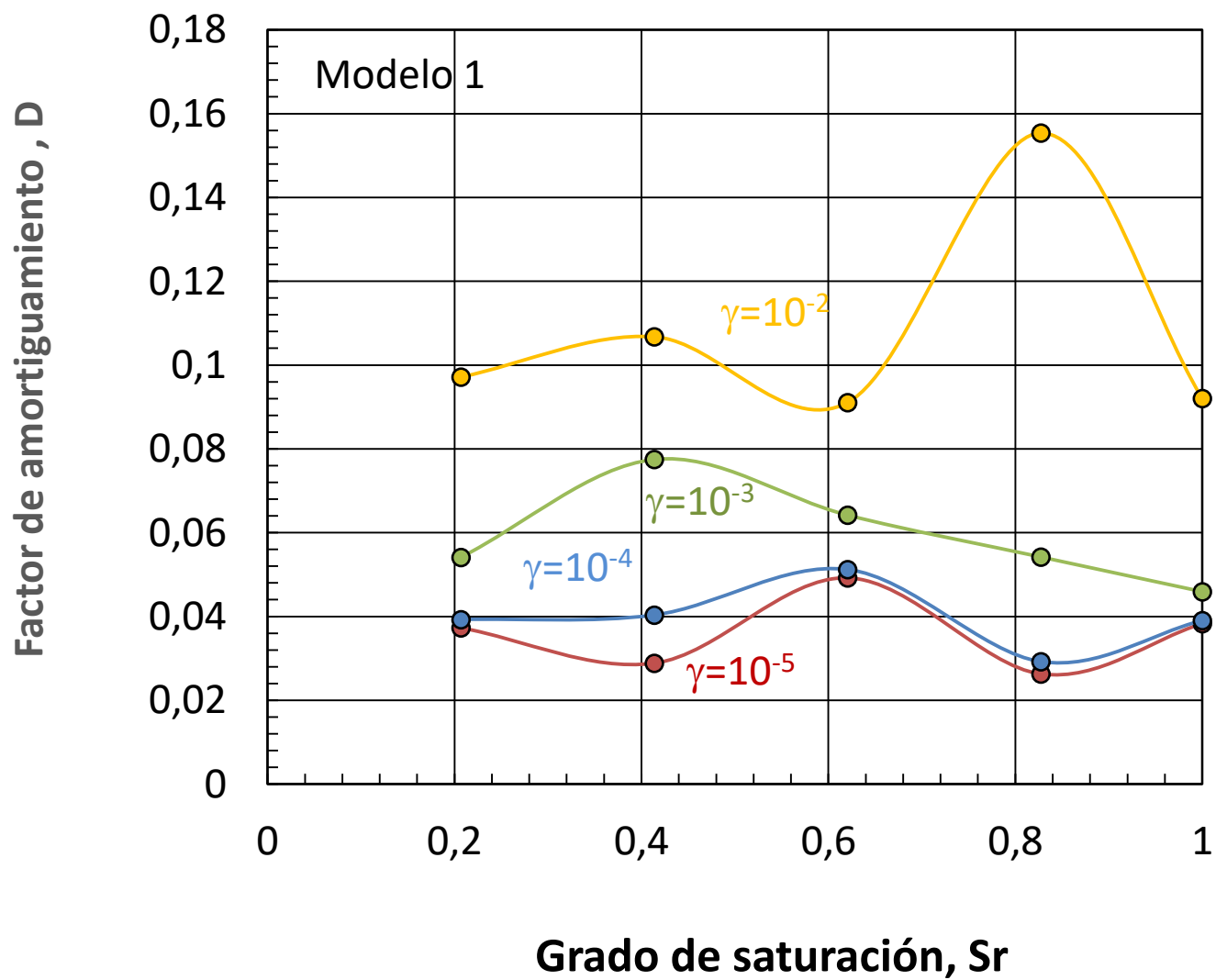


Gráfico 21: Factor de amortiguamiento D vs grado de saturación S_r en función de la deformación de corte γ , modelo de Poucel (2016).

El modelo 1, es el que mejor se ajusta a los resultados reales. Puede verse que los valores del factor de amortiguamiento son bastante variables respecto al grado de saturación del terreno, aunque puede apreciarse una ligera disminución al aumentar el grado de saturación.

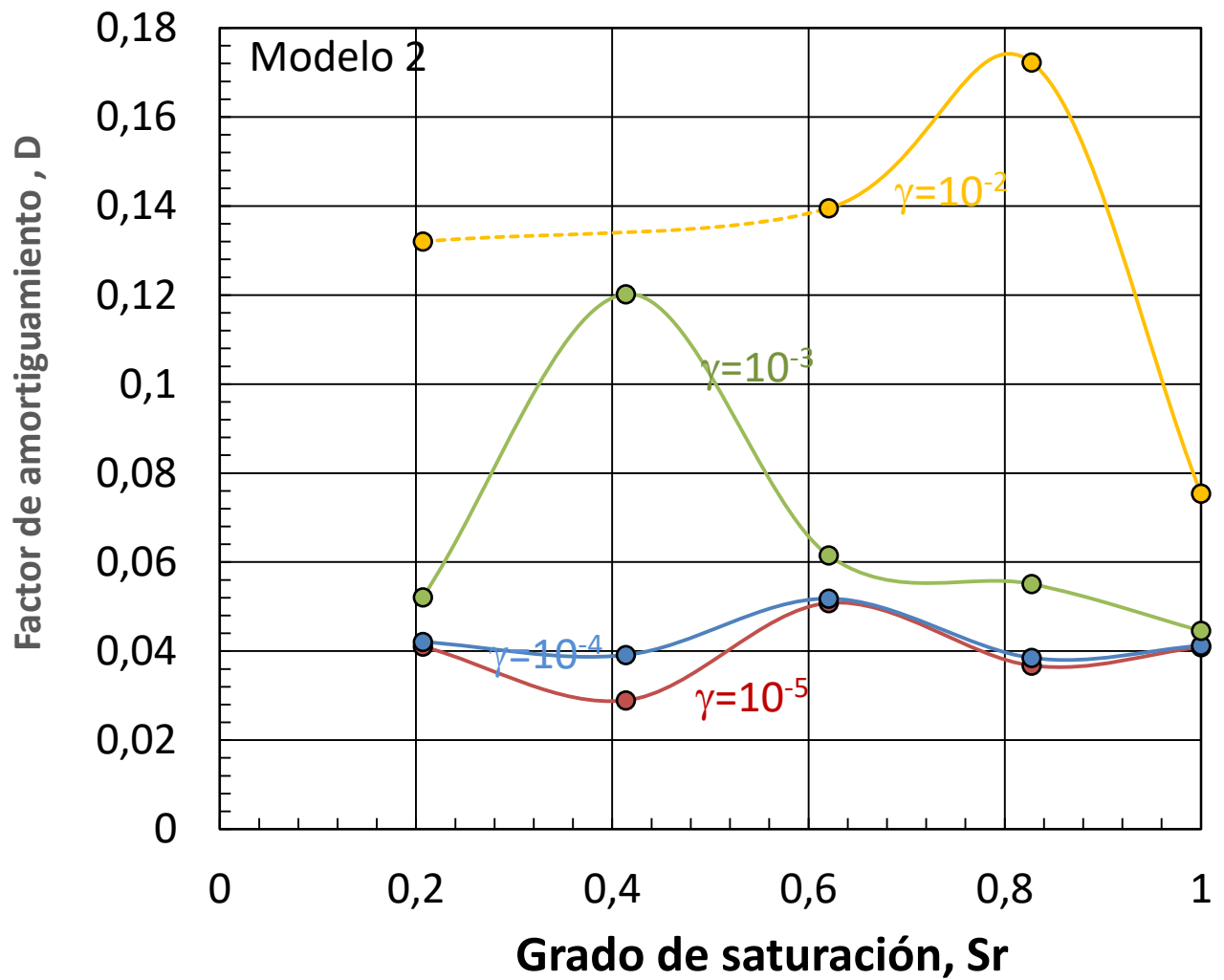


Gráfico 22: Factor de amortiguamiento D vs grado de saturación en función de la deformación de corte γ , modelo de Ratio de amortiguamiento del material (Assimaki, Kaurel, Whittle, 2000).

En el modelo número 2, la exactitud de ajuste no es tan correcta como en el modelo número 1. En la curva correspondiente a $\gamma=10^{-2}$ se puede observar una línea discontinua, la cual representa que el valor correspondiente a un grado de saturación de 0.4 es demasiado elevado y puede ser erróneo.

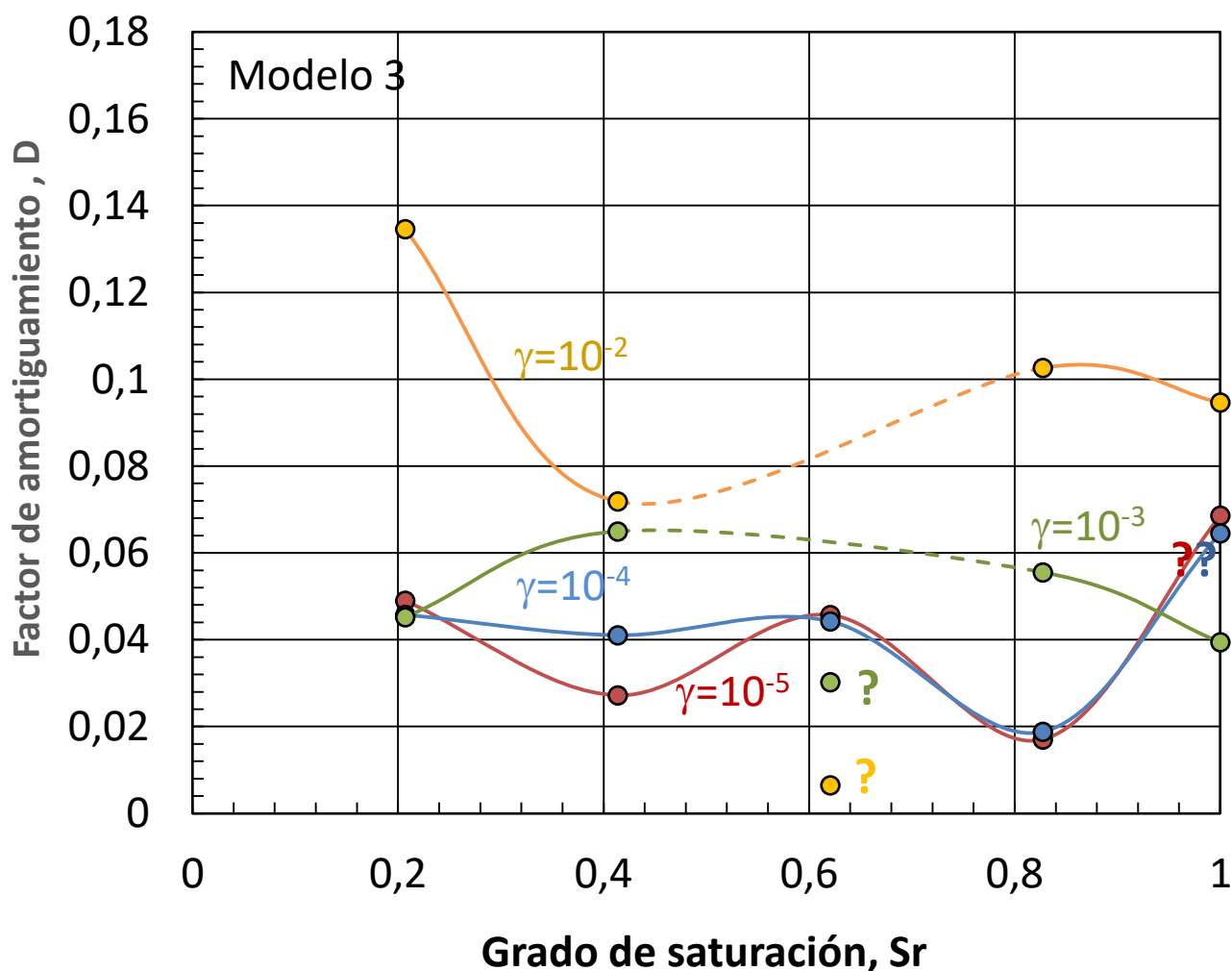


Gráfico 23: Factor de amortiguamiento D vs grado de saturación Sr en función de la deformación de corte γ , modelo de amortiguamiento histerético en modelos de pequeña tensión de rigidez (Brinkgreve, Kappert, Bonnier, 2007)

En este modelo número 3, al igual que en el modelo 2, se obtienen valores dudosos para un grado de saturación de 0.6, en el caso del valor de deformación de corte $\gamma = 10^{-2}$ junto a $\gamma = 10^{-3}$, que corresponden a las deformaciones de corte más grandes.

9.4. EFECTO DE LA SATURACIÓN EN LOS PARAMETROS DE AMORTIGUAMIENTO D_0 y D_{\max}

En el Gráfico 24, pueden verse representados los valores de los parámetros que definen el factor de amortiguamiento, teniendo representados: el valor del factor de amortiguamiento inicial D_0 , el factor de amortiguamiento máximo D_{\max} y la diferencia entre ambos en función del grado de saturación.

Puede verse claramente que, el valor del factor de amortiguamiento inicial D_0 , sufre una pequeña desviación, es decir, que sufre variación entre los valores de las 5 muestras, debido a encontrarnos ante resultados experimentales de laboratorio. Teóricamente este valor inicial debería de permanecer constante

puesto que podría asociarse al amortiguamiento del sistema de ensayo.

También puede apreciarse la curva que tiene el factor de amortiguamiento máximo, representado en color rojo.

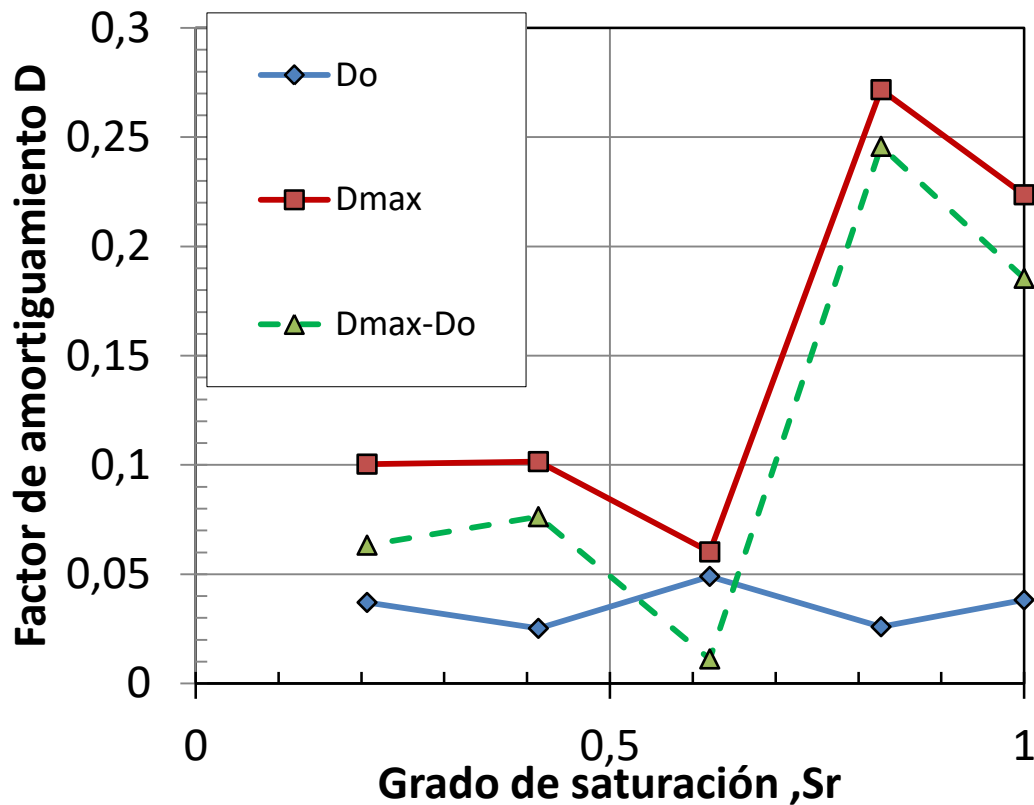


Gráfico 24: Variación de factor de amortiguamiento D respecto al grado de saturación S_r .

9.5. RELACIÓN ENTRE EL MÓDULO DE CORTE Y EL FACTOR DE AMORTIGUAMIENTO

En el Gráfico 25 se muestra la variación del factor de amortiguamiento D obtenido en cada muestra respecto al módulo de corte normalizado G/G_0 . El hecho de que cuando una de estas variables aumenta la otra disminuya casi de la misma forma hace que se tenga una relación aproximadamente lineal. Hay puntos y valores que salen de la exacta linealidad, debido a que el estudio realizado se trata de un estudio experimental que puede fallar por distintas razones y tiene un rango de error que hay que considerar.

También se puede ver claramente en esta relación, que los factores de amortiguamiento aumentan cuando la humedad de las muestras aumenta (salvo para la muestra correspondiente al 62% de grado de saturación), teniendo el mayor valor de factor de amortiguamiento para la muestra saturada, tal y como se ha mencionado anteriormente.

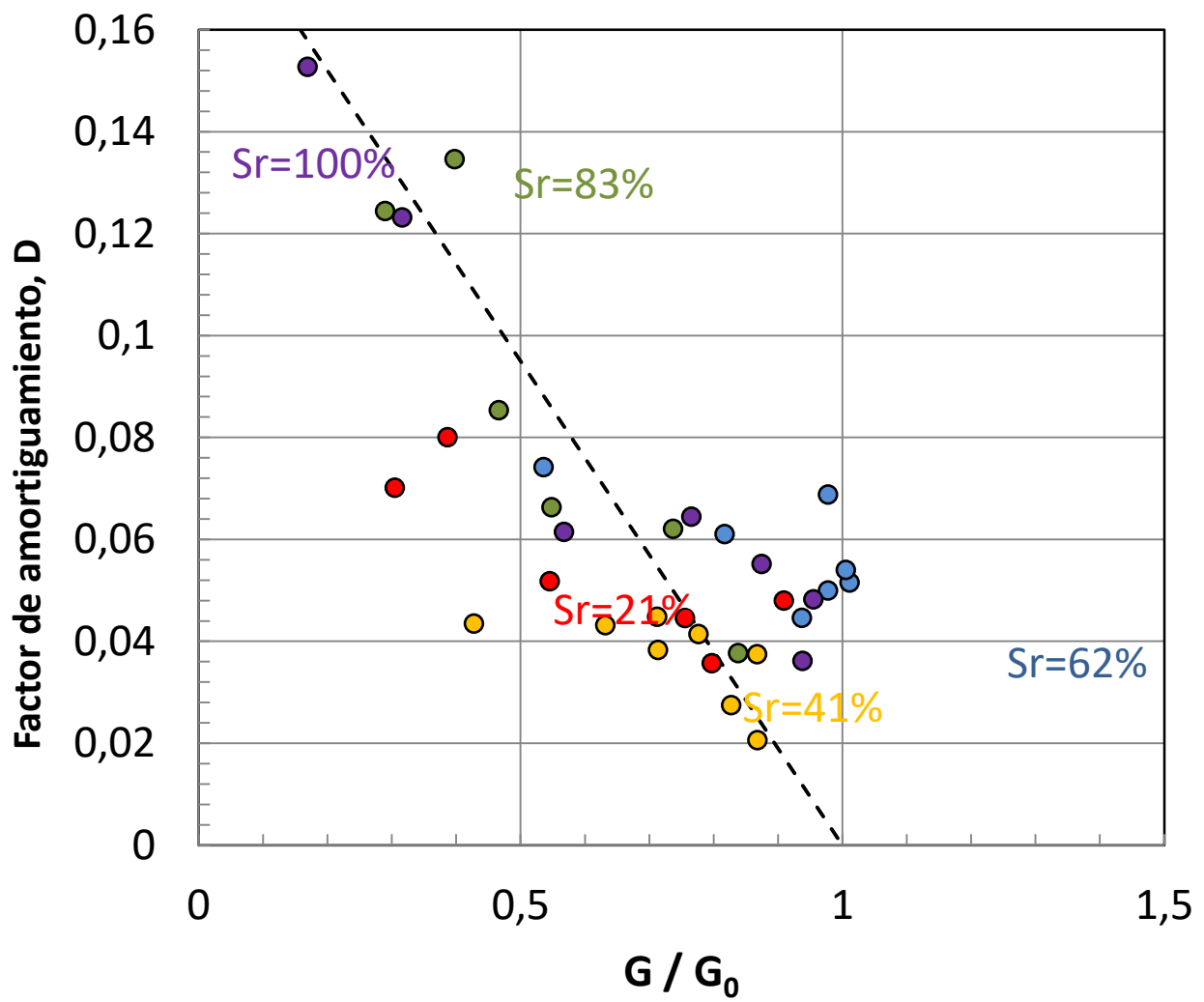


Gráfico 25: Factor de amortiguamiento D respecto a módulo de corte normalizado G/G_0 .

10. COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON EL EQUIPO TRIAXIAL

Al comparar los resultados obtenidos mediante la columna resonante y los resultados obtenidos en el equipo triaxial, se han realizado las comparaciones mediante gráficos de factor de amortiguamiento D y módulo de corte G , respecto a la deformación de corte γ .

Se ha recalcado anteriormente, que los valores obtenidos mediante la columna resonante son medidas realizadas con deformaciones de corte menores respecto a las medidas realizadas mediante el equipo triaxial. De esta forma, los valores, teóricamente, deben encajar aproximadamente a partir de un valor de deformación de corte $\gamma=10^{-3}$.

10.1. MUESTRA 1. GRADO DE SATURACIÓN DEL 62%

La muestra 1 tiene un 15% de humedad, tras ensayarla en la columna resonante y simultáneamente en el equipo triaxial, se han obtenido los siguientes Gráfico 26 y Gráfico 27.

En dicha muestra, se puede ver que tanto en el gráfico de módulo de corte G respecto a la deformación de corte γ , como en correspondiente al factor de amortiguamiento D respecto a la deformación de corte γ , los resultados de los dos equipos de ensayo se acoplan de una forma muy fluida, encajando los datos de uno, perfectamente con los datos del otro.

Se ven representados en puntos verdes los resultados obtenidos en este estudio, y en distintos colores los ajustes de cada etapa que paralelamente se han obtenido mediante el equipo triaxial (Navarro, 2019), teniendo en cuenta de todos los datos obtenidos, son correspondientes a los mayores de $\gamma= 10^{-3}$, correspondientes a los datos más fiables y mejor medidos mediante el equipo triaxial.

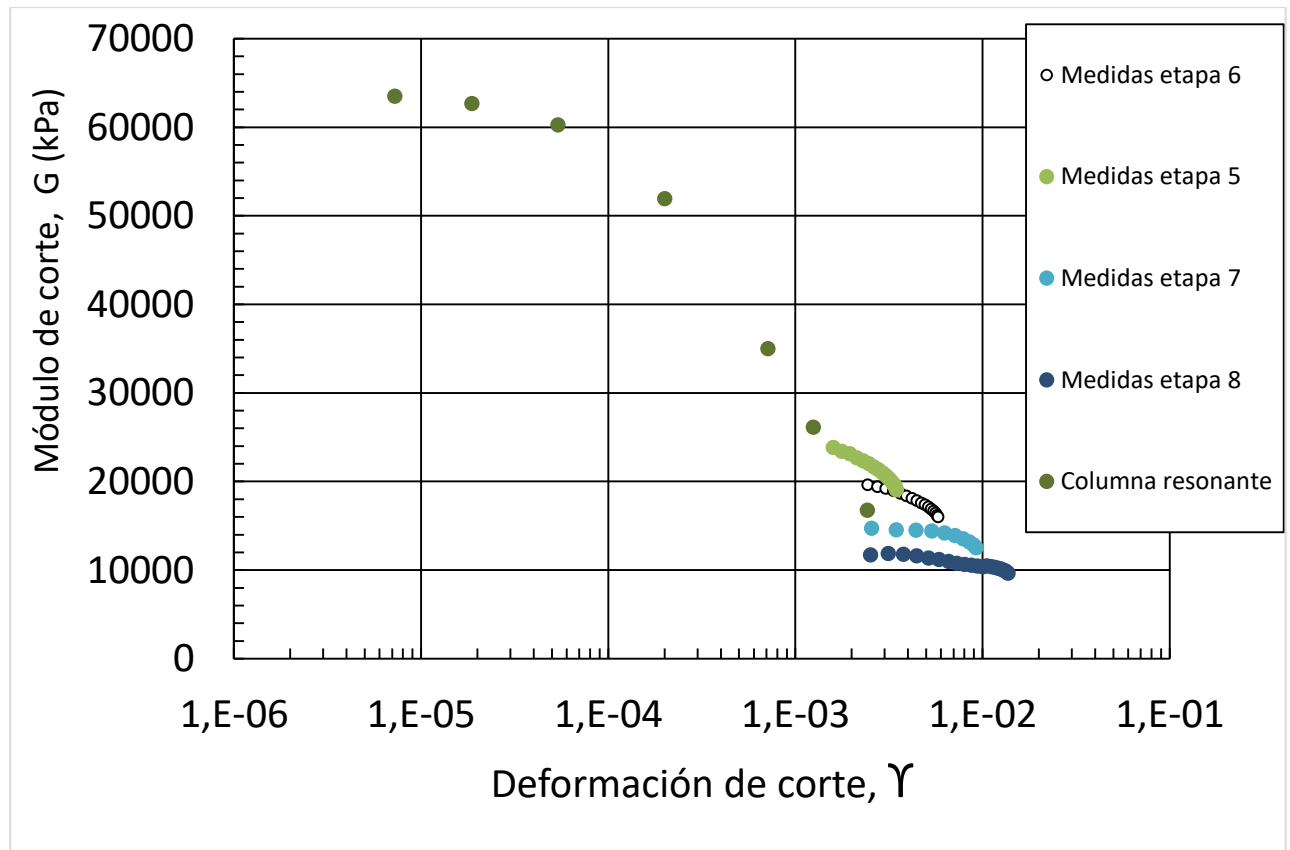


Gráfico 26: Comparación de los resultados entre la columna resonante y el equipo triaxial, módulo de corte G respecto a deformación de corte γ , muestra con humedad 15%.

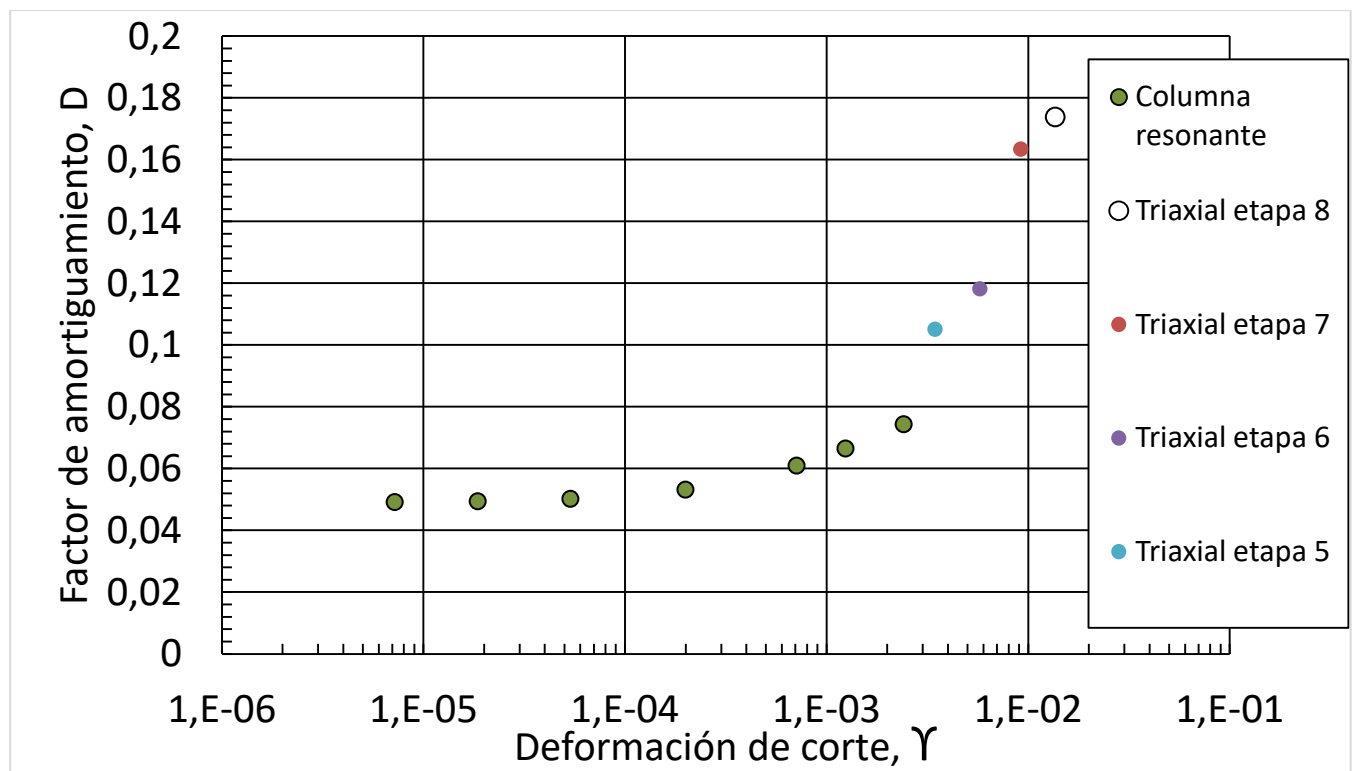


Gráfico 27: Comparación de los resultados entre la columna resonante y el equipo triaxial, factor de amortiguamiento D respecto a deformación de corte γ , muestra con humedad 15%.

10.2. MUESTRA 2. GRADO DE SATURACIÓN DEL 41%

La muestra número 2 corresponde al 10% de humedad, tras ensayarla en la columna resonante y simultáneamente en el equipo triaxial, se ha obtenido el Gráfico 28 y el Gráfico 29.

En dicha muestra, se puede ver que tanto en el gráfico de módulo de corte G respecto a la deformación de corte γ , como en correspondiente al factor de amortiguamiento D respecto a la deformación de corte γ , los resultados obtenidos en el equipo triaxial en comparación a la columna resonante, corresponden a unos valores del módulo de corte y del factor de amortiguamiento más altos. De esta forma, en la comparación los resultados, estos no encajan exactamente entre ellos, teniendo una anomalía. Esto puede ser debido a un error experimental. Puede ser que, aún teniendo en cuenta las mismas condiciones en las muestras ensayadas en los dos equipos, se hayan encontrado diferencias y por lo tanto los resultados no sean exactamente encajados. De todas formas puede verse que en los dos casos las trayectorias tienen sentido aunque el acople no sea perfecto.

Se observa que en esta muestra en concreto, los valores medidos mediante la columna resonante no llegan al valor de deformación de corte $\gamma = 10^{-3}$, teniendo de esta forma un rango de valores de deformación sin datos.

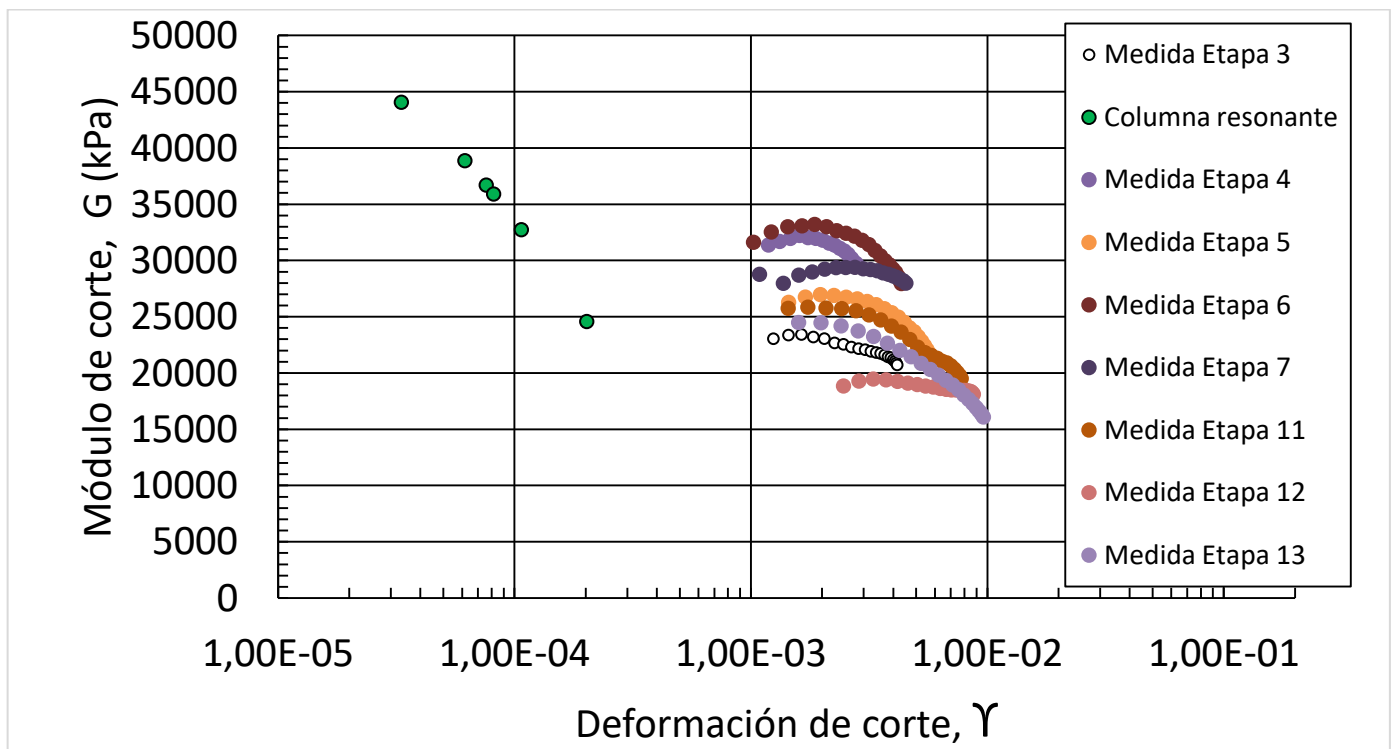


Gráfico 28: Comparación de los resultados entre la columna resonante y el equipo triaxial, módulo de corte G respecto a deformación de corte γ , muestra con humedad 10%.

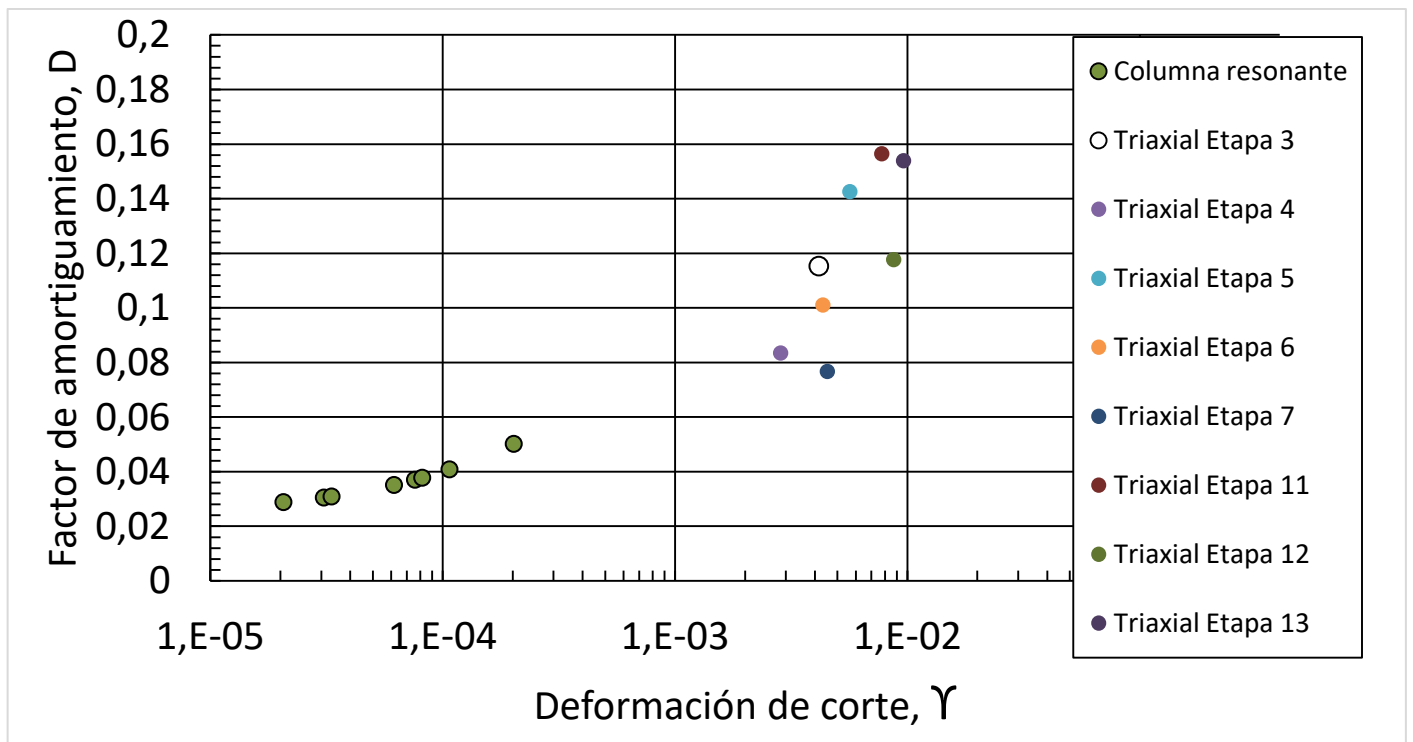


Gráfico 29: Comparación de los resultados entre la columna resonante y el equipo triaxial, factor de amortiguamiento D respecto a deformación de corte γ , muestra con humedad 10%.

10.3. MUESTRA 3. GRADO DE SATURACIÓN DEL 83%

La muestra número 3 es la correspondiente a la humedad de un 20%, tras ensayarla en la columna resonante y simultáneamente en el equipo triaxial, se han obtenido los siguientes gráficos, Gráfico 30 y Gráfico 31.

En dicha muestra, se puede ver que tanto en el gráfico de módulo de corte G respecto a la deformación de corte γ , como en el correspondiente al factor de amortiguamiento D respecto a la deformación de corte γ , los resultados obtenidos en el equipo triaxial en comparación a la columna resonante, responden a una trayectoria continua. La anomalía que puede verse en dicha comparación, es que, en la columna resonante, los datos obtenidos respecto a la deformación de corte, traspasan el valor de $\gamma = 10^{-3}$, por los que los valores se superponen entre ellos. Esto se ve más claramente en el gráfico correspondiente al módulo de corte G respecto a la deformación de corte γ (Gráfico 30). De todas formas, se observa que la trayectoria obtenida en ambos equipos es continua entre ellas, lo cual hace ver que los resultados obtenidos son lógicos y correctos.

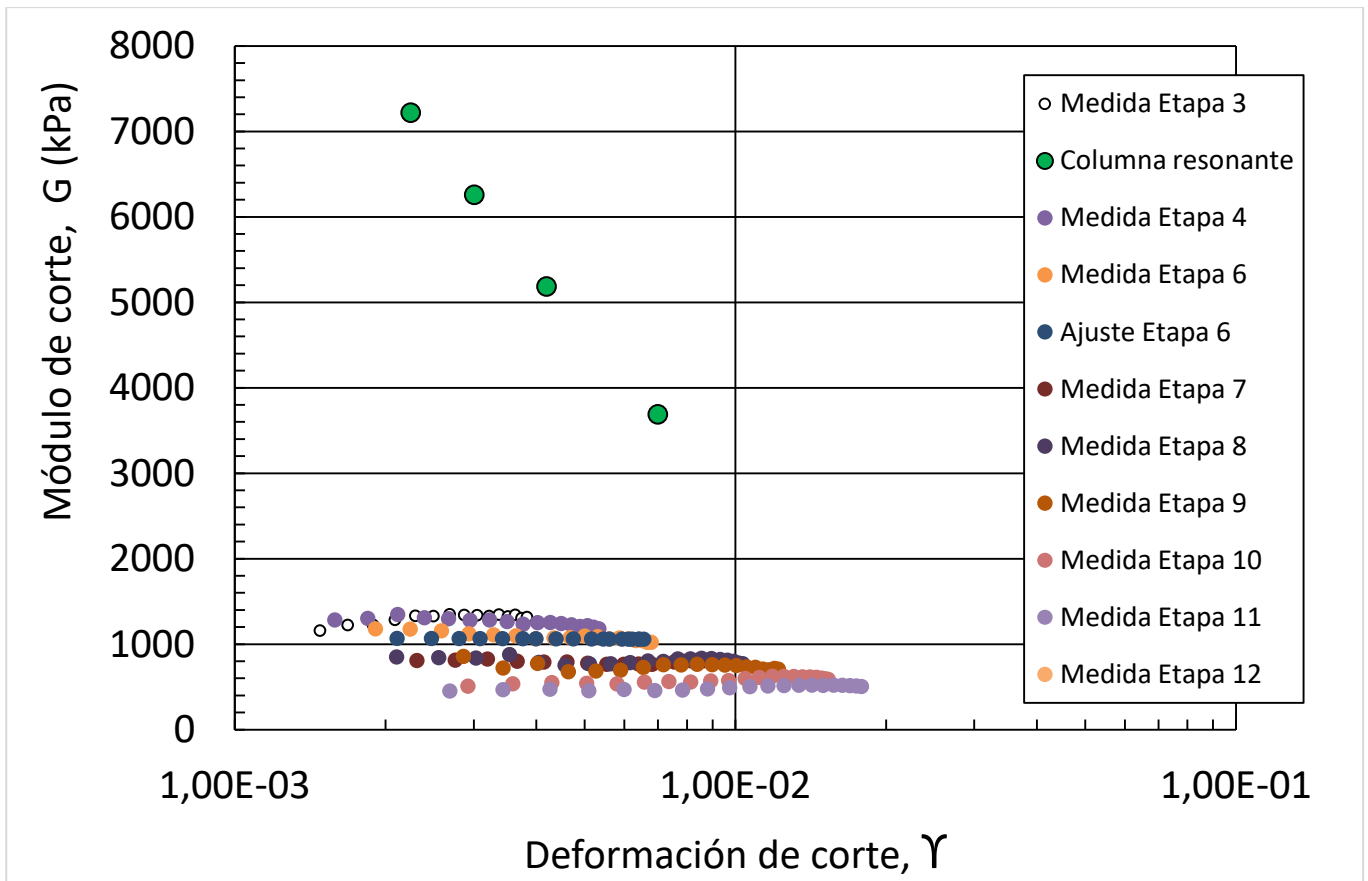


Gráfico 30: Comparación de los resultados entre la columna resonante y el equipo triaxial, módulo de corte G respecto a deformación de corte γ , muestra con humedad 20%.

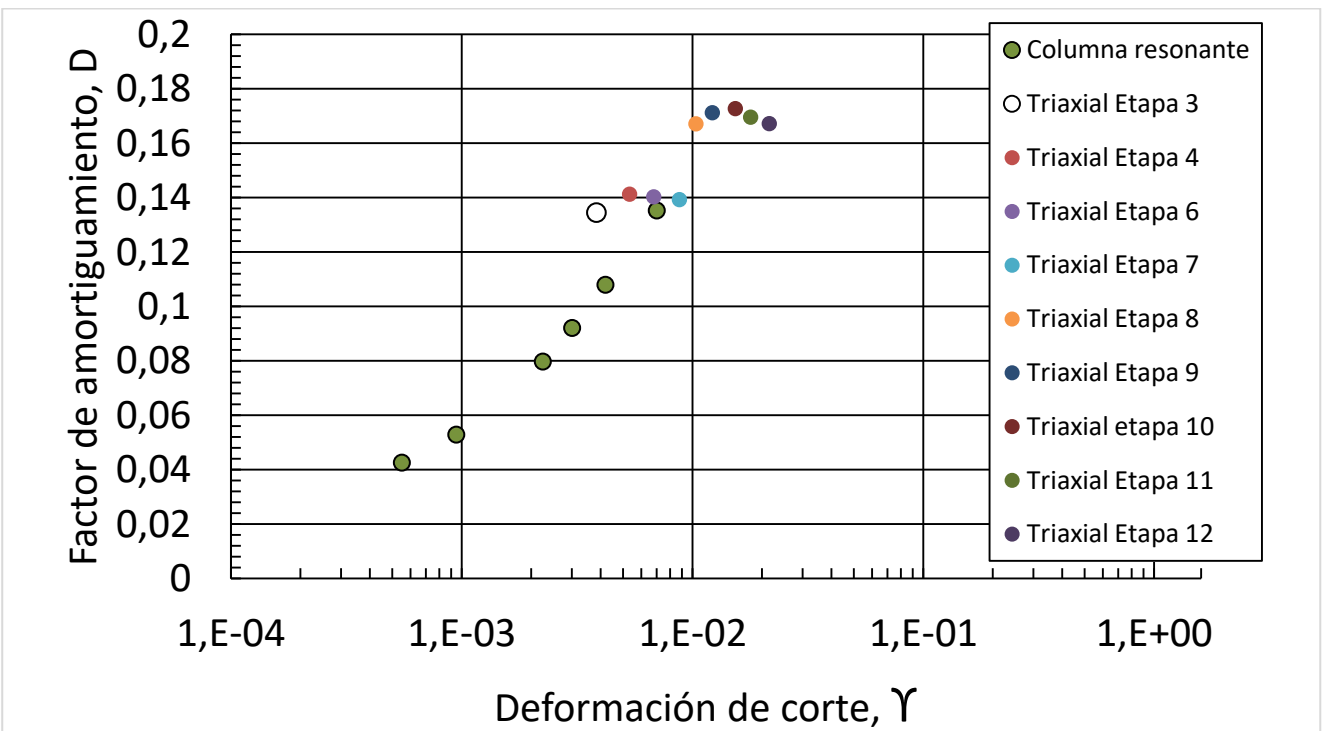


Gráfico 31: Comparación de los resultados entre la columna resonante y el equipo triaxial, factor de amortiguamiento D respecto a deformación de corte γ , muestra con humedad 20%.

10.4. MUESTRA 4. GRADO DE SATURACIÓN DEL 100%

La muestra número 4, es la correspondiente a la muestra saturada, es decir, con una humedad del 100%. Esta muestra es la más complicada de ensayaren ambos equipos.

Se pueden ver a continuación representados los gráficos correspondientes al módulo de corte G y el factor de amortiguamiento D respecto a la deformación de corte γ (Gráfico 32 y Gráfico 33).

Puede decirse que, los resultados más anómalos obtenidos en este estudio de comparación entre los dos equipos corresponden a la muestra saturada, por su dificultad de ensayo. En los gráficos, puede verse que el rango de las deformaciones de corte en los dos equipos coincide, en vez de acoplarse de una forma continua, teniendo mediante la columna resonante mayores deformaciones que mediante el equipo triaxial.

De todas formas, y aún coincidiendo el rango de deformaciones, los resultados se acoplan entre sí, teniendo aproximadamente la misma trayectoria lógica. Esto se ve con más claridad en el Gráfico 32.

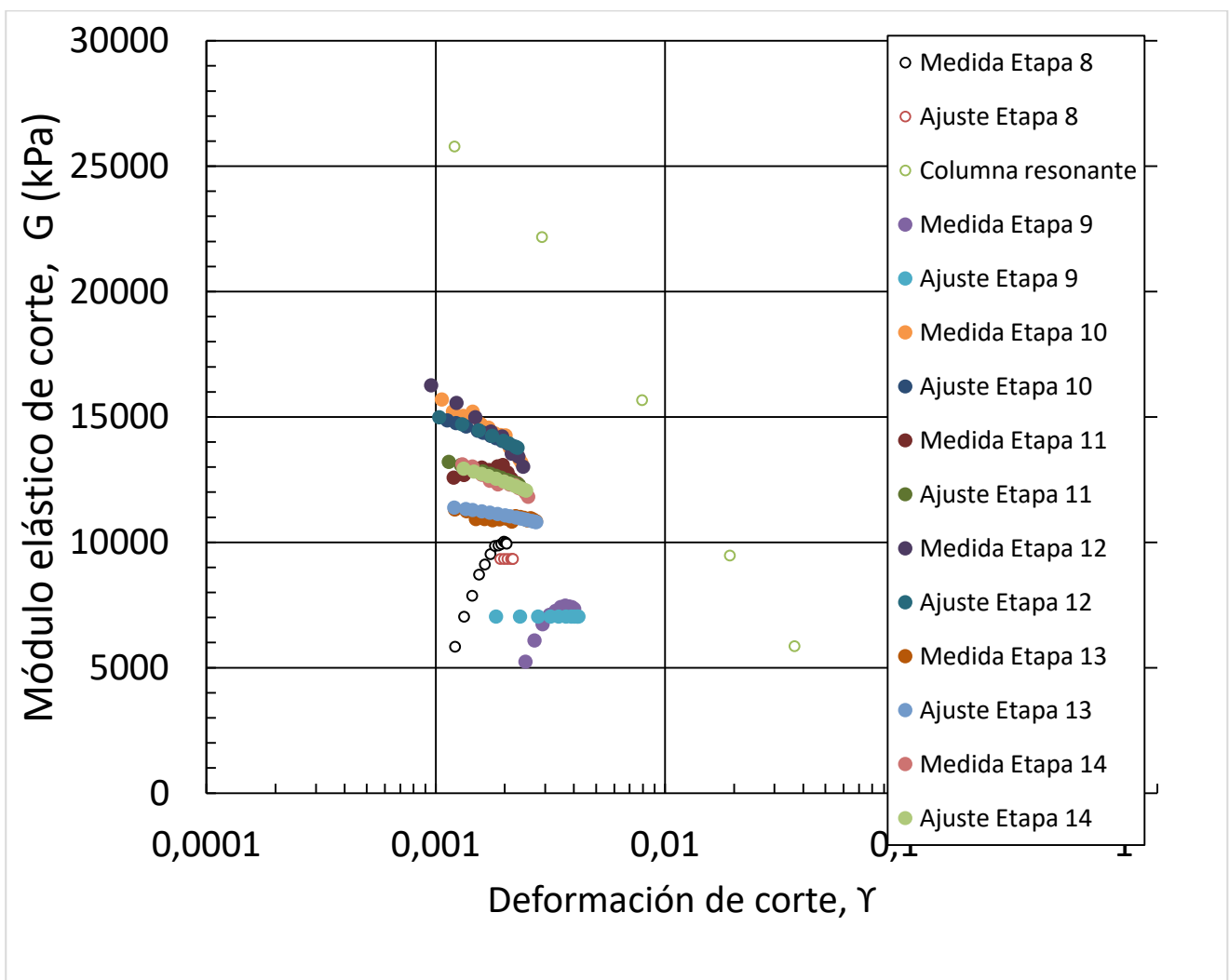


Gráfico 32: Comparación de los resultados entre la columna resonante y el equipo triaxial, módulo de corte G respecto a deformación de corte γ , muestra saturada.

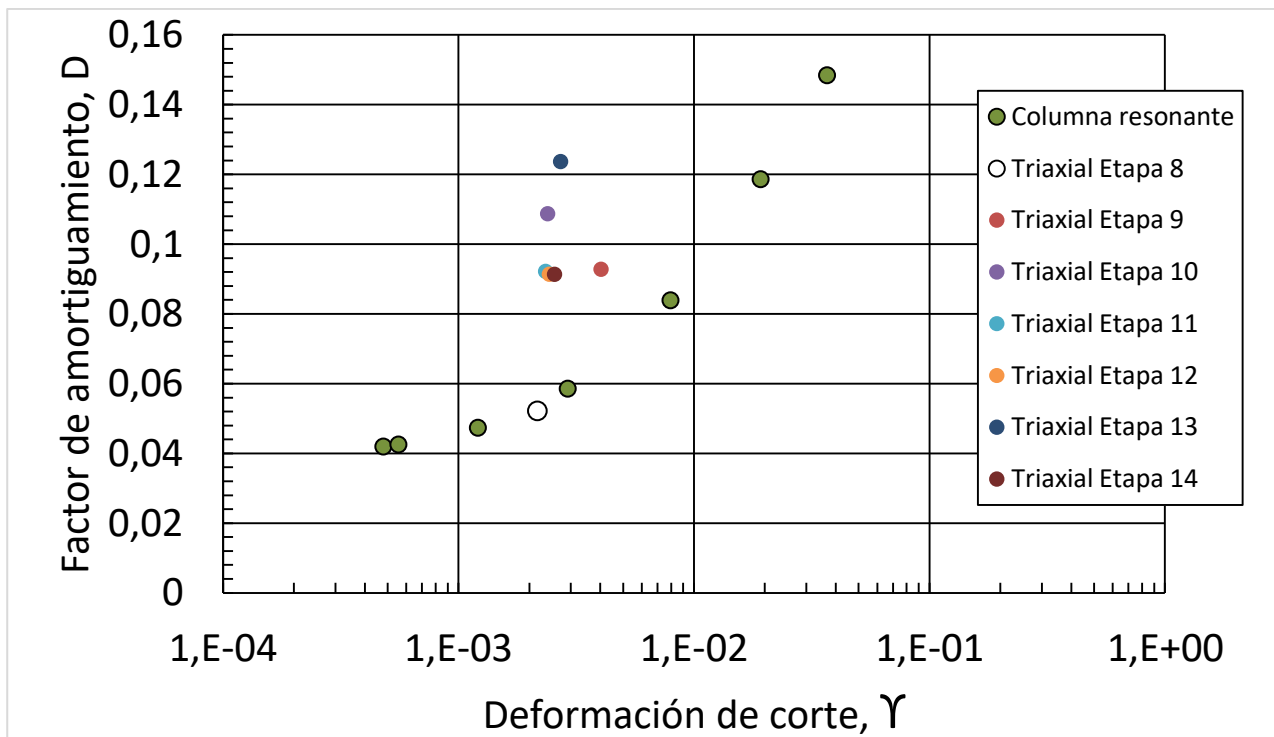


Gráfico 33: Comparación de los resultados entre la columna resonante y el equipo triaxial, factor de amortiguamiento D respecto a deformación de corte γ , muestra saturada.

10.5. MUESTRA 5. GRADO DE SATURACIÓN DEL 21%

La muestra número 5, corresponde al 5% de humedad, tras ensayarla en la columna resonante y simultáneamente en el equipo triaxial, se han obtenido los siguientes Gráfico 34 y Gráfico 35.

En dicha muestra, de una forma parecida a la que se ha podido ver en la muestra número 2 (humedad 10%), puede verse en los gráficos de módulo de corte G y factor de amortiguamiento D respecto a la deformación de corte γ , que los valores obtenidos en el equipo triaxial en comparación a los obtenidos mediante la columna resonante, los valores correspondientes al módulo y al factor de amortiguamiento, son más altos en este primero.

De esta forma puede verse que en la comparación los resultados no se acoplan perfectamente entre ellos, teniendo un desfase entre los dos equipos. Pero aún observando esta anomalía de rango de valores, puede verse que las trayectorias siguen la misma dirección y que aún no encajando a la perfección, los resultados son coherentes.

Esta anomalía puede darse debido a alguna diferencia al realizar las muestras. Tanto la muestra número 2 (humedad 10%) como esta misma (humedad 5%), son muestras que se encuentran muy secas, es decir en el extremo de grado de saturación cerca de $S_r=0$, por lo que esto puede complicar la obtención de resultados fiables.

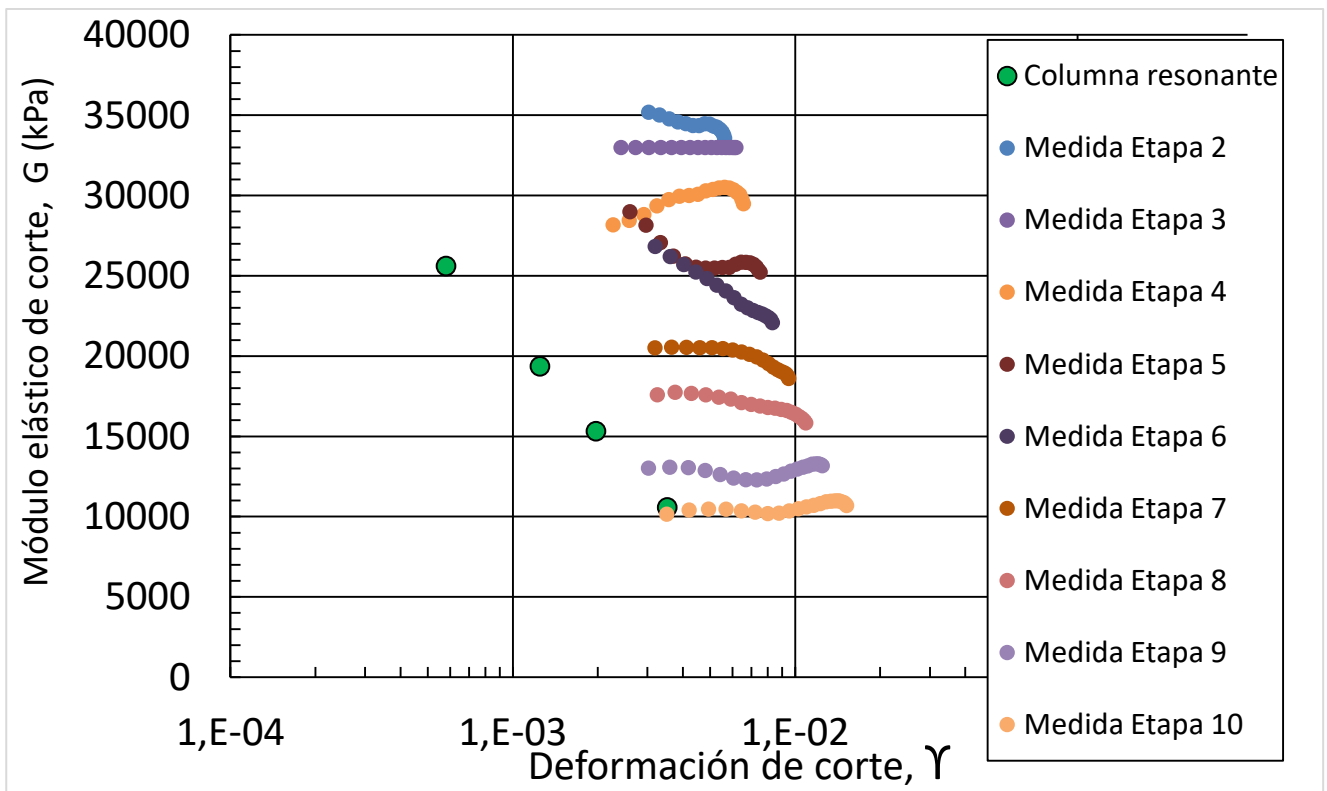


Gráfico 34: Comparación de los resultados entre la columna resonante y el equipo triaxial, módulo de corte G respecto a deformación de corte γ , muestra con humedad 5%.

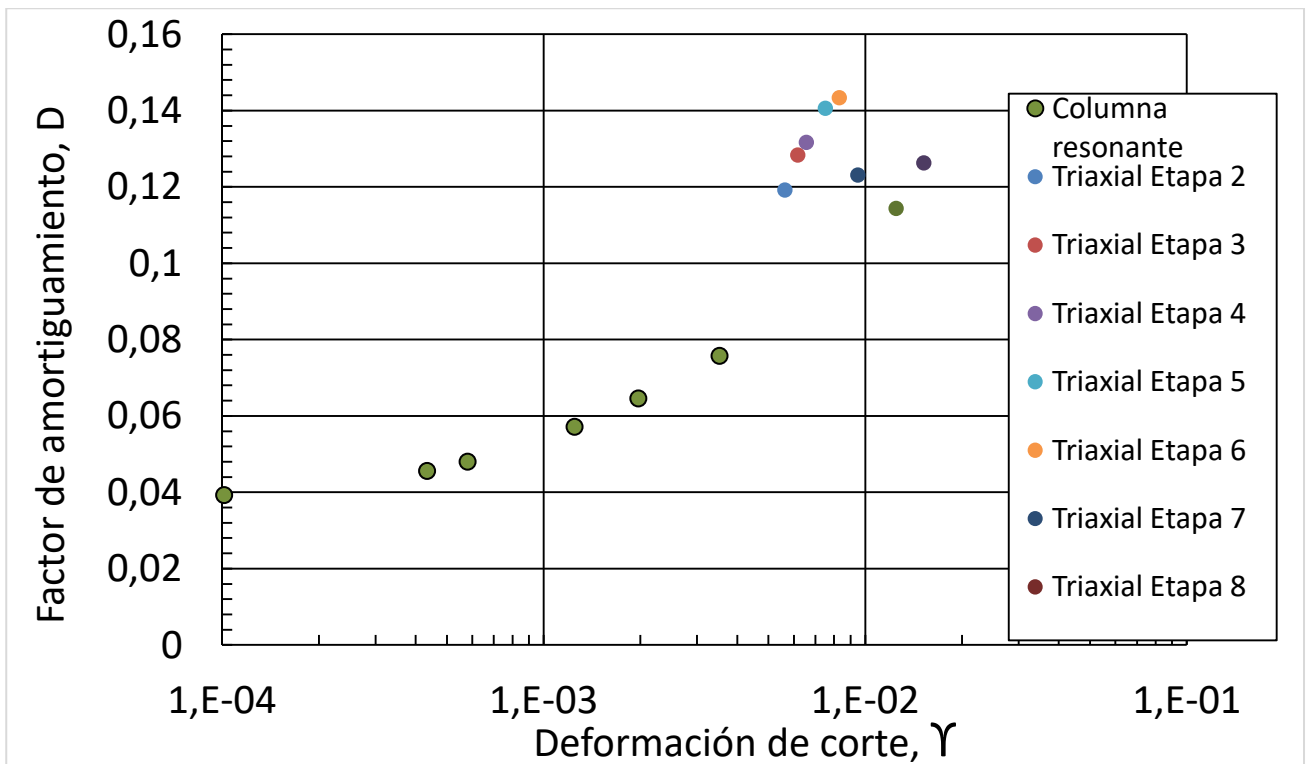


Gráfico 35: Comparación de los resultados entre la columna resonante y el equipo triaxial, factor de amortiguamiento D respecto a deformación de corte γ , muestra con humedad 5%.

11. COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON J. POUCELL

Para terminar, se han realizado comparaciones con los resultados obtenidos por el trabajo anteriormente realizado por Poucell (2016).

De esta forma y teniendo en cuenta los ensayos realizados por Poucell en el anterior estudio y los ensayos realizados actualmente, en circunstancias similares en este estudio, se han obtenido los siguientes gráficos correspondientes al módulo de corte inicial, al módulo de corte inicial normalizado con el módulo de corte inicial promedio para los distintos grados de saturación y factor de amortiguamiento D respecto al grado de saturación, representados en los Gráfico 36, Gráfico 37, Gráfico 38 y Gráfico 39.

Para dicha comparación, se han tenido en cuenta los valores correspondientes a densidades secas parecidas y grados de saturación que se acerquen, para poder ver una comparación de resultados más clara. Los datos que se han tenido en cuenta para dicha comparación, que fueron obtenidos por Poucell (2016), pueden verse representados en Tabla 10.

Muestra	Sr	Yd (Mg/m ³)	G ₀ (MPa)	D ₀	D _{max}	D _{max} -D ₀
17r	98,22	1,629	105,04	0,016	0,389	0,373
16r	82,54	1,627	38,55	0,034	0,384	0,35
9	60,19	1,626	113,36	0,034	0,264	0,23
5	42,62	1,622	173,42	0,023	0,342	0,319
14	18,77	1,631	215,98	0,014	0,481	0,467

Tabla 10: Resultados obtenidos por J. Poucell, en el estudio realizado en el año 2016.

En el Gráfico 36, pueden verse que los resultados obtenidos siguen una trayectoria similar. Sin embargo, los valores de Poucell (2016) son sistemáticamente mayores que los obtenidos en este estudio.

En el Gráfico 37 se observa que, si los módulos se normalizan respecto al módulo promedio para cada campaña de ensayos, los resultados obtenidos mediante la columna resonante en laboratorio en el año 2016 y los obtenidos actualmente, tienen un buen acople y siguen una trayectoria muy similar respecto a los altibajos de los valores de módulo de corte respecto al grado de saturación.

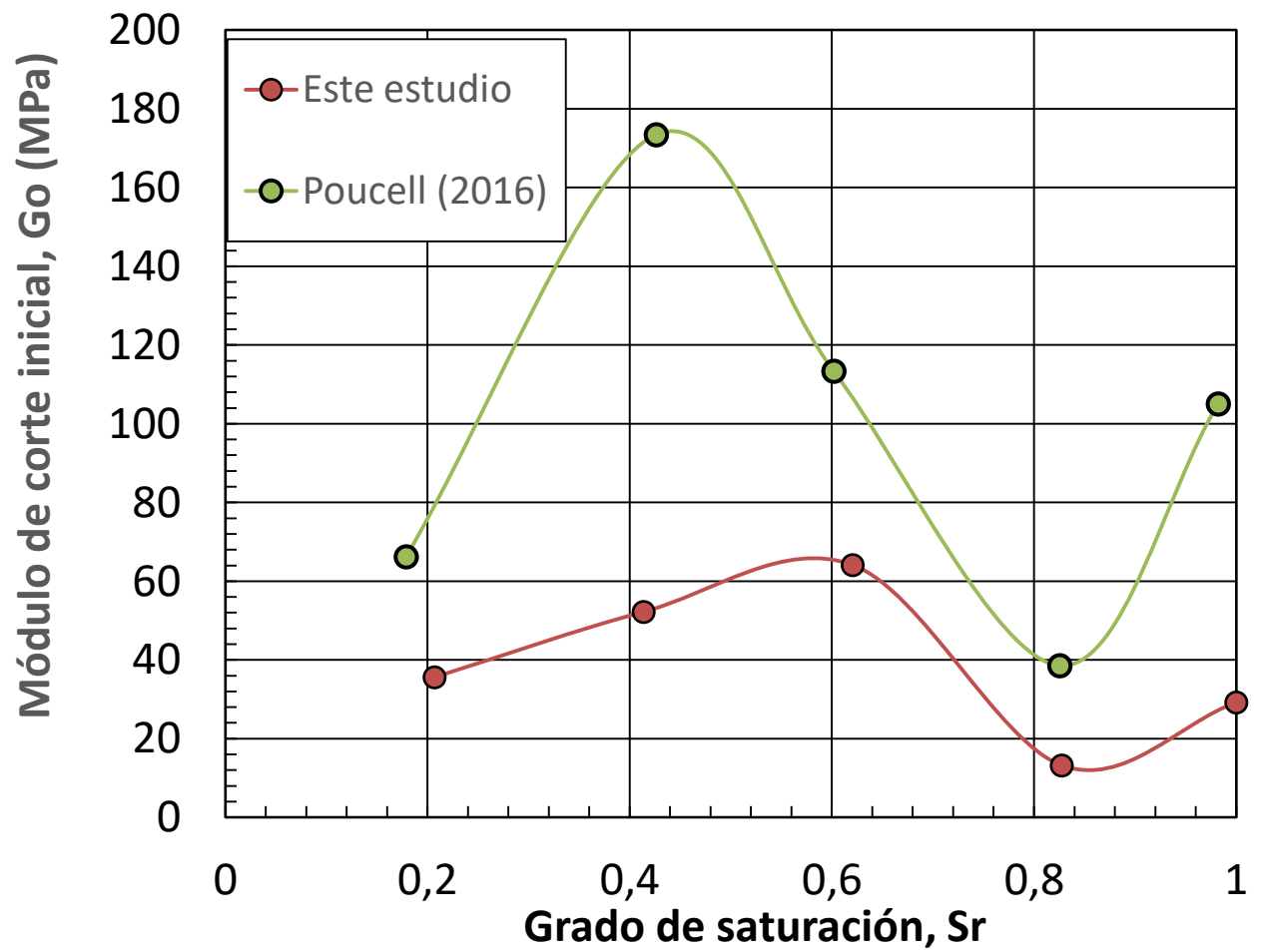


Gráfico 36: Comparación de resultados con Poucell (2016), módulo de corte inicial respecto al grado de saturación S_r .

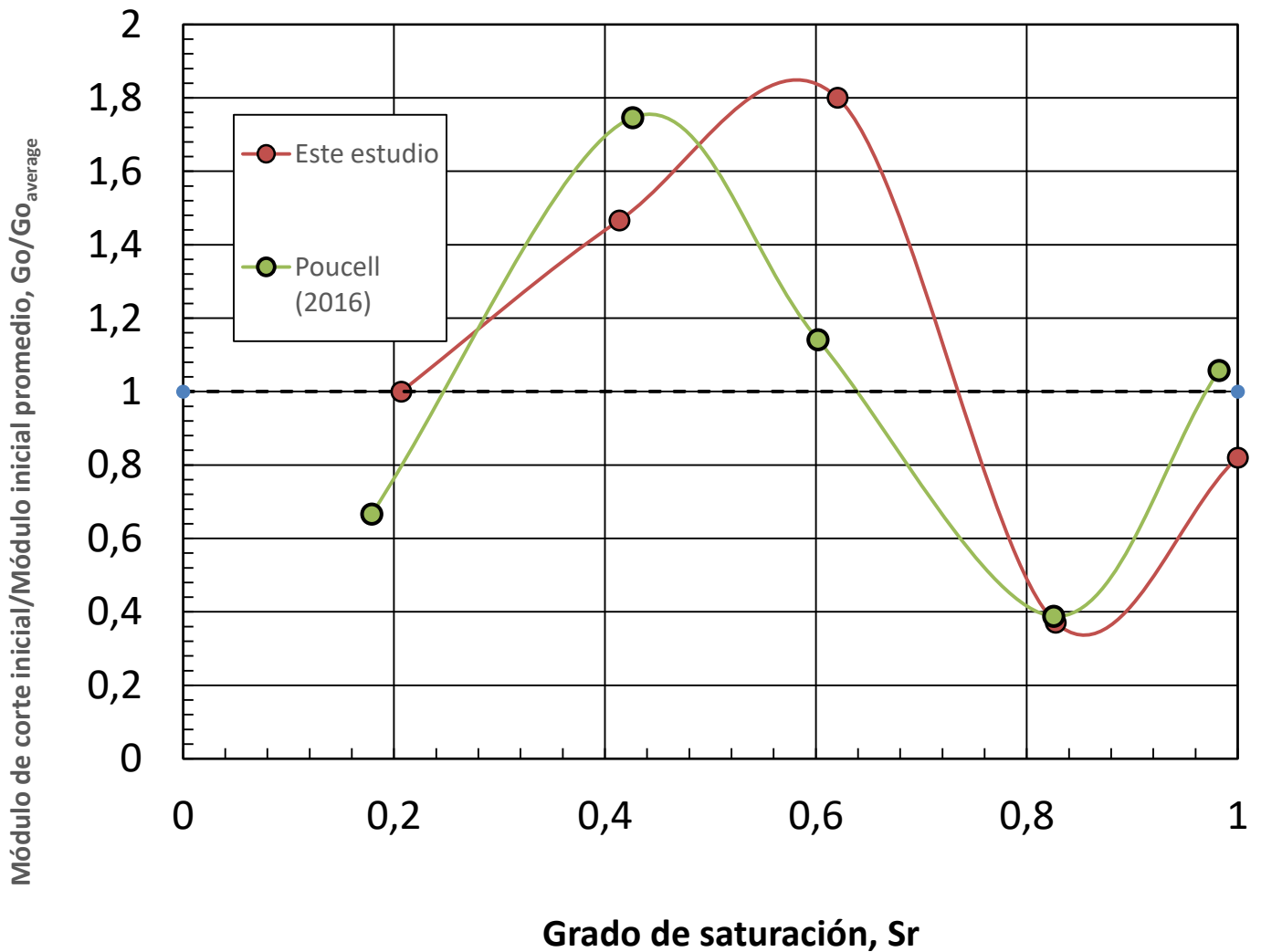


Gráfico 37: Comparación de resultados con J. Poucell, módulo de corte inicial partido módulo de corte inicial promedio respecto al grado de saturación S_r .

En Gráfico 38, se observa una ligera diferencia de valores respecto al factor de amortiguamiento D obtenido en este estudio y el medido en el año 2016 por Poucell. Este factor de amortiguamiento corresponde al valor constante de deformación de corte $\gamma=10^{-3}$. Se puede analizar que, el valor obtenido el año 2016 es ligeramente más alto que el valor obtenido en este actual estudio, en el cual la tenencia del factor de amortiguamiento muestra una tendencia descendente, a diferencia del estudio realizado el año 2016, en el cual la tenencia aumenta cuando el grado de saturación aumenta.

De todas formas, durante este actual estudio y teniendo en cuenta distintos grados de deformación, se ha visto que efectivamente el factor de amortiguamiento D , tiene una tendencia ascendente cuando el grado de saturación S_r aumenta.

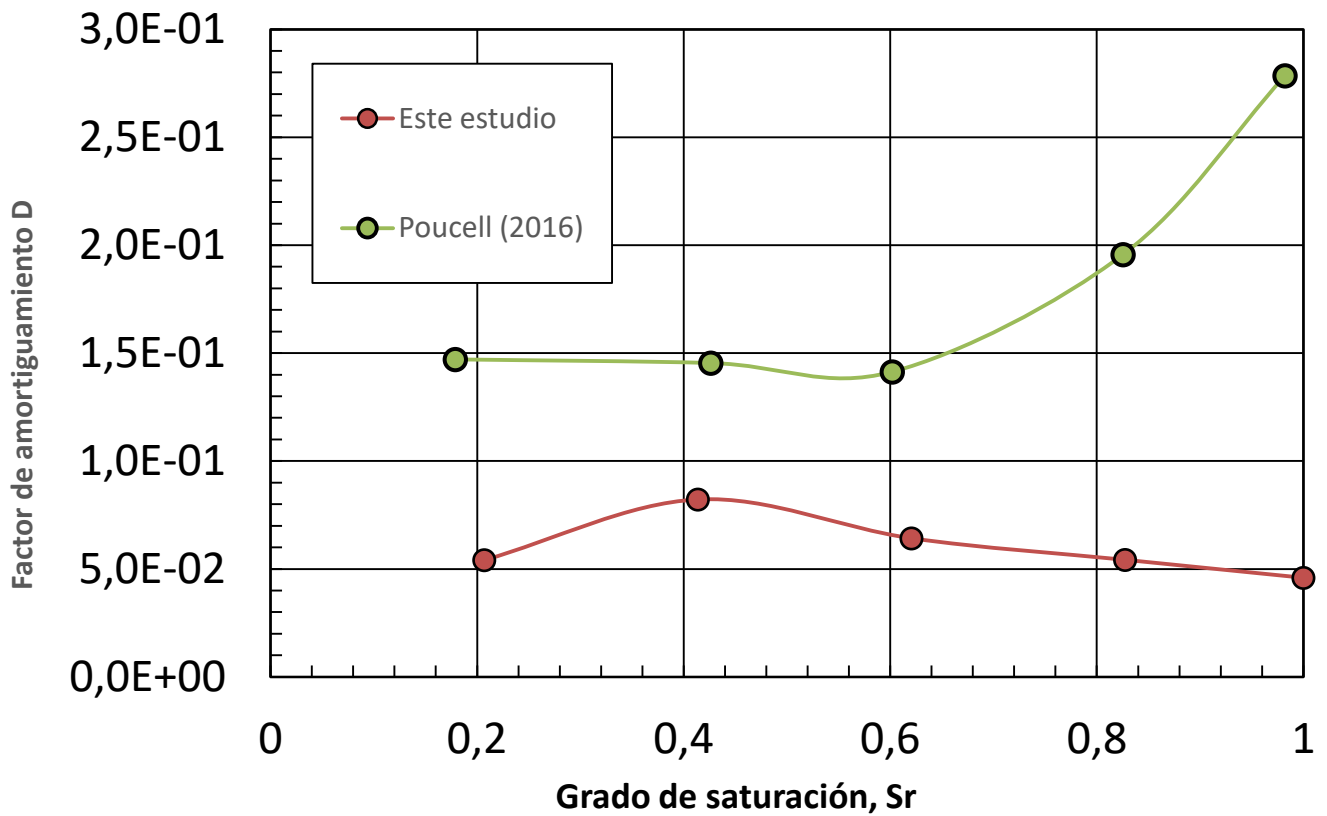


Gráfico 38: Comparación de resultados con J. Poucell, factor de amortiguamiento D respecto al grado de saturación S_r , para una deformación de corte constante, correspondiente a 10^{-3} .

Puede observarse que la tendencia del factor de amortiguamiento es más parecida entre los dos estudios, para un grado de deformación de corte más pequeño, correspondiente al valor de 10^{-5} , tal y como puede verse en el Gráfico 39. Es destacable que, al tener en cuenta valores tan pequeños de deformación de corte, los valores del factor de amortiguamiento, son muy similares a los del factor de amortiguamiento inicial D_0 .

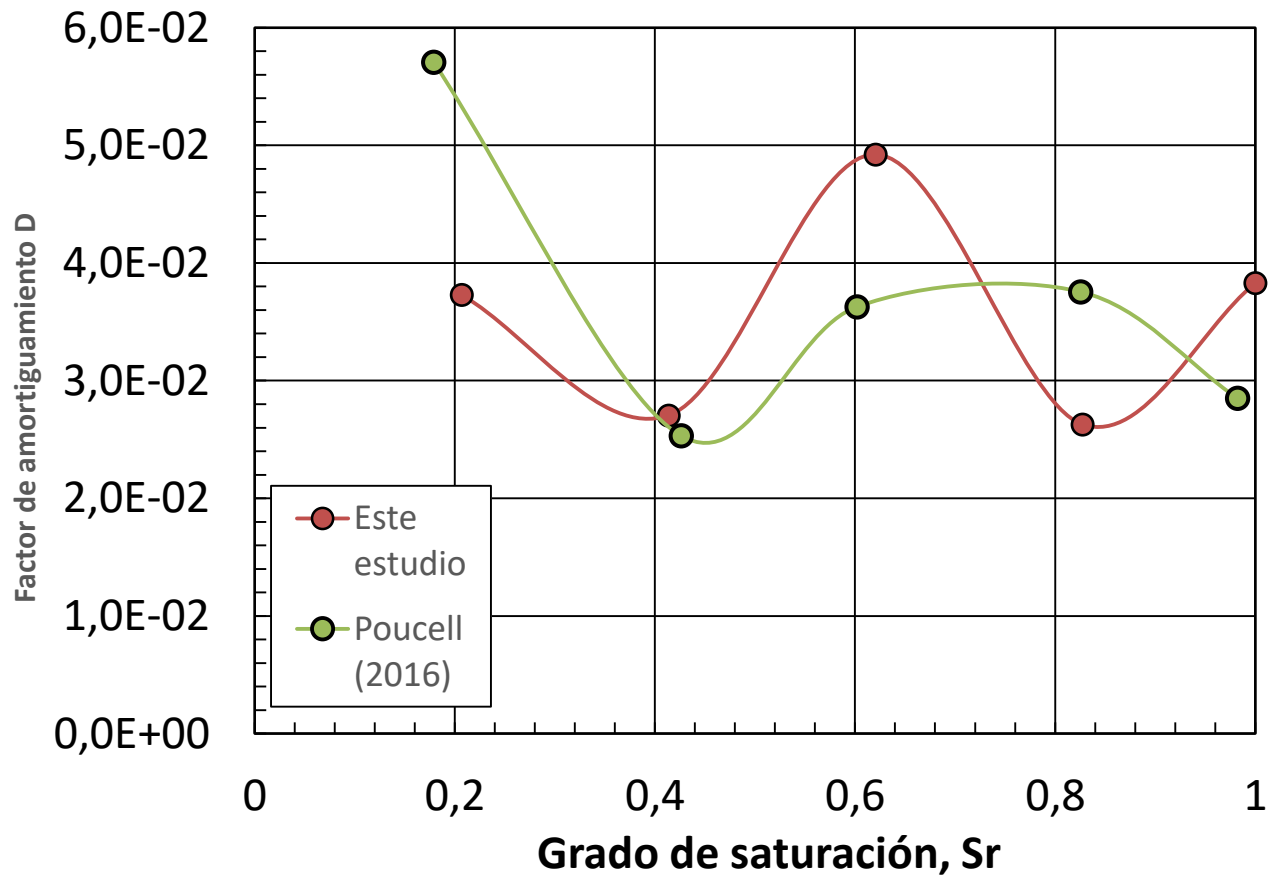


Gráfico 39: Comparación de resultados con J. Poucell, factor de amortiguamiento D respecto al grado de saturación S_r , para una deformación de corte constante, correspondiente a 10^{-5} .

12. CONCLUSIONES

En este trabajo fin de máster, se ha querido analizar el amortiguamiento de la arcilla limosa del llano de Barcelona, realizando para ello ensayos de carga cíclica mediante la columna resonante. Para tener una mayor visibilidad en el análisis, se han incluido y comparado los resultados para el mismo número de muestras en las mismas condiciones (experimentales), realizando ensayos en el equipo triaxial con unas mayores deformaciones. Los resultados obtenidos, se han comparado también, con el estudio realizado por J. Poucell, en el año 2016, en la Universidad Politécnica de Cataluña.

Los valores de deformación de corte γ de los resultados obtenidos mediante la columna resonante, oscilan entre $1 \cdot 10^{-5}$ y $1 \cdot 10^{-2}$.

Se han querido obtener los valores de los extremos del grado de saturación S_r , para poder así obtener datos del amortiguamiento respecto al grado de saturación del suelo compactado.

Se observa que, tanto el valor del módulo de corte G normalizado como el factor de amortiguamiento, siguen la trayectoria habitual en suelo vista en el Gráfico 2, lo cual proporciona una información positiva de los resultados obtenidos.

El valor del módulo de corte G tiene una tendencia ascendente cuando el grado de saturación S_r del suelo disminuye hasta llegar a un valor máximo para grados de saturación del orden del 40%, para grados de saturación mayores el módulo tiende a disminuir. Sin embargo, se ha observado que muy cerca de la saturación el módulo vuelve a crecer al aumentar el grado de saturación.

Se puede observar en este estudio que, el factor de amortiguamiento D del suelo de arcilla limosa del llano de Barcelona, disminuye ligeramente (Gráfico 21, Gráfico 22, Gráfico 23 y Gráfico 38, Gráfico 39) cuando aumenta el grado de saturación S_r , aunque la dispersión de los resultados no permite llegar a conclusiones definitivas. .

Se puede concluir también, que de los tres modelos de aproximación analítica para la relación entre el factor de amortiguamiento y la deformación utilizados en este trabajo el modelo que mejor se ajusta a las medidas realizadas corresponde al modelo de Poucell (2016).

Se ha confirmado también, que efectivamente las muestras más complicadas de ensayar y en las que es más difícil obtener resultados fiables, corresponden a las muestras de los extremos del grado de saturación S_r . Esto se ha visto con claridad al realizar las comparaciones de resultados con el equipo triaxial, ya que el resultado que mejor se acopla con este equipo corresponde a la muestra 1, con un grado de saturación de 62,0% (humedad 15%). En cambio, si se observan las muestras correspondientes a otros grados de saturación las comparaciones no proporcionan resultados tan satisfactorios, aunque en la mayor parte de los casos las anomalías observadas son aceptables. Estas anomalías son mayores en la probeta más seca y la probeta saturada. Se puede concluir que, los valores obtenidos experimentalmente se ajustan de una forma

bastante adecuada a las expresiones analíticas existentes en la literatura.

Respecto a los valores comparados con el anterior estudio realizado en la Universidad Politécnica de Cataluña por Poucell (2016), se pueden observar comparaciones lógicas, trayectorias similares y conclusiones parecidas. Sin embargo, hay que tener en cuenta que en este actual trabajo, además de tener en cuenta las aproximaciones realizadas por dicho anterior trabajo, se han considerado para analizar la variación del amortiguamiento con la deformación dos modelos más: el modelo del ratio de amortiguamiento del material (Assimaki, Kaurel, Whittle, 2000) y el modelo de amortiguamiento histerético en modelos de pequeñas deformaciones (Brinkgreve, Kappert, Bonnier, 2017).

Por otra parte, la realización en paralelo de ensayos triaxiales ha permitido obtener medidas para deformaciones mayores a las obtenidas en la columna resonante y complementar los resultados obtenidos en este equipo.

13. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

1. Aparte de tener en cuenta el equipo triaxial, el cual mide deformaciones de corte mayores a las medidas mediante la columna resonante, es interesante tener en cuenta también ensayos que puedan medir rangos de deformaciones de corte más pequeñas, como pueden ser los ensayos sísmicos
2. Realizar un estudio centrado solamente en el estudio de los extremos del valor de grado de saturación, con un mayor número de ensayos. Ya que se puede ver que los valores intermedios tienen unos valores continuos y fiables, sería interesante centrar la atención solo en los valores extremos de estos. Debido al conocimiento ya contrastado de los valores intermedios.
3. Realizar ensayos para muestras con distintas densidades secas entre sí, para poder ver de esta forma cómo afecta esto a los resultados obtenidos.
4. Poder realizar ensayos en equipos más actualizados, ya que el utilizado para realizar este ensayo proviene de los años 80 y puede dar lugar a dificultades a la hora de toma de datos en laboratorio.

14. REFERENCIAS

- Araya Contreras, S.E. (2017). Medición de parámetros dinámicos de arenas con finos mediante columna resonante. Memoria para optar al título de ingeniería civil. Departamento de ingeniería civil. Universidad de Chile. Facultad de ciencias físicas y matemáticas. Santiago de Chile.
- Assimaki, D., Kausel, D., Whittle, A. (2000). Model for Dynamic Shear Modulus and Damping for Granular Soils. J.Geotech. Geoenviron. Eng. Volume 126 (10), pp., 859-869.
- Atkinson, J.M., Salford, G. (1991). Experimental determination of stress-strain-time characteristic in laboratory and situ test. Proceedings X ECSMFE, Volume 3, pp.915-956.
- Barchiesi, A.M., Fernández, F., Martín Placci, H. (2010). Construcción de una columna resonante y primeras mediciones. XX Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica 2010, Mendoza, Argentina.
- Bolt. A. (1989). Estudio de los movimientos sísmicos fuertes del suelo. Universidad de California, Berkeley, California. Física de la Tierra, núm. 1. 11-50. Ed. Univ. Compl. Madrid. 1989
- Brinkgreve, R.B.J., Kappert, M.H., Bonnier, P.G. (2007). Histeretic Damping in a Small-Strain Stiffness Model.Numerical Models in Geomechanics- NUMOG X. , Rhodes, 737-742.
- Cascante, G. Vanderkooy, J. Chung, W. (2003). Diference between current and voltage measurements in resonant-colum testing. Canadian Geotechnical Journal, Volume 40, pp., 4.
- Cruz Wilches, J.A. (2017), Influencia de los cambios de humedad en las propiedades dinámicas de arcillas reconstituidas, a través del ensayo de columna resonante, pp., 10-73.
- Díaz Rodríguez, A. (2005). Ensayo de columna resonante. Noruega, ed. Dinámica de Suelos. México, Limusa, pp. 129-131.
- Gens, A., Alonso E., Suriol, J., Lloret, A. (1995). Effect of structure on the volumetric behaviour of compacted soil. Proc. Ist Int. Conf. On Unsaturated Soils, Paris, Rotterdam, Balkema, Volume 1, pp., 83-88.

González Blandón, C.M., Romo Organista, M.P. (2011). Estimación de propiedades dinámicas de arcillas. Revista de Ingeniería Sísmica, Volumen 84, pp., 1-23.

Hardin, B.O., Drnevich, V.P. (1971). Shear modulus and damping in soils I, measurements and parameters effects. Journal of SMF div, Proc, ASCE, 98 (SM6), pp., 603-624.

Ishihara, K. (1996). Soil behaviour in earthquake geotechnics. Oxford Engineering Science Series 46, Oxford University Press Inc., New York.

Mononobe, H. (1936). Sismic stability of earth dam. Proc. 2nd Int. Congr. Large Dams. Volume IV.

Navarro, M. (2019). Análisis del amortiguamiento de suelos compactados sometidos a carga cíclica en el equipo triaxial, Trabajo Final de Máster. Máster de Ingeniería del Terreno. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.

Okamoto, S. (1973). Introduction to earthquake engineering. University of Tokyo Press, Tokyo, Japan .

Otálvaro, I. (2008). Evaluación de la respuesta dinámica de sitio para el sector de Aragón de Medellín. DYNA, Volumen 75, Número 156, p. 147-155, Pontificia Universidad Javeriana Calí.

Poucell, J. (2016). Amortiguamiento en suelos compactados. Trabajo Final de Máster. Máster de Ingeniería del Terreno. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.

Santos, J.A., Correja, A.G. (2001). Reference threshold shear strain of soil, its application to obtain a unique strain-dependent shear modules curve of soil. Proceedings 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Istanbul, s.n., pp., 267-270.

Seed, H.B., Iddris, L.M. (1967). Analysis of liquefaction, Niigata Earthquake. ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, Volume 93(3), pp. 83-108.

Suriol, J. (1993). Medida de la deformabilidad de suelos mediante el equipo de la columna resonante. Revista de Obras Públicas, pp. 57-66.

Suriol, J., Gens, A., Alonso, E. (1998). Behaviour of compacted soils in suction controlled edometer. Proc. 2nt

Int. Conf. on Unsaturated Soils. Beijing, International Academic Publishers, Volume 1, pp., 436-443.

Suriol, J., Lloret, A., (2007). Cambios en la estructura de suelos compactados frente al humedecimiento y secado. Ingeniería Civil, Volumen 147, pp., 7-76.

Villavicencio, J. (2008). Estudio de la deformación angular y volumétrica así como del módulo de corte de un suelo mediante el equipo de la columna resonante. Trabajo Final de Máster. Máster de Ingeniería del Terreno. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.

ANEXO A: PLANTILLA UTILIZADA PARA TOMA DE DATOS EN LABORATORIO

Fr (Hz) Resonancia	Vpp (V) Excitación	Vpp (V) Respuesta	A0 (V)	A1 (V)	A2 (V)	A3 (V)	A4 (V)	A5 (V)	A6 (V)	A7 (V)	A8 (V)	A9 (V)
...												

ANEXO B: MUESTRA 1, HUMEDAD 15%

- Humedad teórica 15%
- Grado de saturación teórico 62,047%

Muestra	1
Densidad seca (Mg/m³)	1,63
Humedad (%)	13,23
Jm (kgm²)	0,0026
D (m)	0,038
L(m)	0,076
Kacc [(m/s²)/V]	6,5
Ra (m)	0,051
Densidad (kg/m³)	1845,674
Volumen (m³)	8,62E-05
Masa (kg)	0,159
Js(kgm²)	2,87E-05
K (MPa s²)	0,038
kdef (1/V)	0,269

- Resultados de laboratorio:

Lectura An en laboratorio, mediante CR																	
Día y Hora inicio consolidación	Día y hora de aplicación de carga de corte	Tiempo desde aplic. de la carga (hrs)	Valor excitación (Vpp)	Fr resonancia (Hz)	Mód. G (MPa)	Resp. acc (Vpp)	Def. de corte	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
22-2-19 12:45	22-2-19 13:20	0:35:00	0,0136	39,68	60,0	0,0156	2,7E-06										
			0,046	40,53	62,6	0,038	6,2E-06										
			0,0552	41,22	64,7	0,0456	7,2E-06	0,044	0,0284	0,0178	0,0174	0,0114	0,0112	0,0112	0,0096	0,0048	0,0032
			0,146	41,1	64,4	0,117	1,9E-05	0,1104	0,0736	0,0608	0,0336	0,0144	0,0096	0,0024	0	0	0
			0,444	40,53	62,6	0,328	5,4E-05	0,344	0,288	0,216	0,132	0,092	0,056	0,04	0,032	0,028	0,024
			1,42	37,05	52,3	1,02	2,0E-04	1,024	0,816	0,544	0,368	0,256	0,176	0,128	0,112	0,064	0,048
			4,84	30	34,3	2,38	7,1E-04	2,44	1,76	1	0,52	0,36	0,2	0,16	0,12	0,08	0,05
			7,32	25,641	25,1	3,04	1,2E-03	3,08	2,8	2,04	0,92	0,48	0,24	0,16	0,16	0,12	0,12
			12,9	21,72	18,0	4,24	2,4E-03	4,24	3,6	2	0,8	0,4	0,24	0,16	0,16	0,08	0,08

- Ajuste logarítmico:

ln(An) medido en laboratorio

Pendiente de ln(An)

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A0	μ	D
-3,123565	-3,561366	-4,028556	-4,051285	-4,474141	-4,49184	-4,49184	-4,645992	-5,339139	-5,744604	0,03718795	0,24521399	0,03902702
-2,203645	-2,609110	-2,800165	-3,393229	-4,240527	-4,645992	-6,032286				0,15226525	0,60714463	0,09663007
-1,067113	-1,24479	-1,532476	-2,024953	-2,38596	-2,882403	-3,218875	-3,442019	-3,575550	-3,729701	0,35336176	0,32669393	0,05199495
0,023716	-0,203340	-0,608806	-0,999672	-1,362577	-1,737271	-2,055725	-2,189256	-2,74887	-3,036554	1,05910652	0,34428036	0,05479392
0,891998	0,565313	0	-0,653926	-1,021651	-1,609437	-1,832581	-2,120263	-2,525728	-2,995732	2,26089559	0,432436	0,06882433
1,12492	1,029619	0,712949	-0,083381	-0,733969	-1,427116	-1,832581	-1,832581	-2,120263	-2,120263	3,25034496	0,42378377	0,06744728
1,444563	1,280933	0,693147	-0,223143	-0,9162903	-1,427116	-1,832581	-1,832581	-2,525728	-2,525728	4,0748358	0,4869518	0,07750079

$$A_n = A_0 \cdot e^{(-\mu n)}$$

$$D = \frac{\mu}{2\pi}$$

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,03718795	0,02910095	0,02277257	0,01782038	0,01394511	0,01091256	0,00853949	0,00668246	0,00522928	0,0040921
0,15226525	0,08297003	0,04521075	0,02463554	0,01342402	0,00731481	0,00398587	0,00217192	0,00118349	0,00064489
0,35336176	0,25488142	0,18384711	0,13260974	0,095652	0,06899422	0,04976584	0,03589632	0,02589218	0,01867614
1,05910652	0,75062077	0,53198761	0,37703569	0,26721658	0,18938446	0,13422249	0,09512753	0,06741975	0,04778241
2,26089559	1,4671548	0,95207546	0,61782689	0,40092417	0,26017027	0,16883135	0,10955912	0,0710958	0,04613594
3,25034496	2,12756336	1,39262937	0,911567	0,59668022	0,39056623	0,25565114	0,16734039	0,10953523	0,07169797
4,0748358	2,50397295	1,53868299	0,94551554	0,58101613	0,35703247	0,21939526	0,13481765	0,08284499	0,05090797

Estudio experimental del efecto de la saturación en el amortiguamiento dinámico de suelos compactados

Ane Canseco Murua

- Ajuste lineal:

$$D = \frac{\mu}{2\pi}$$

$$A_n = A_0 \cdot e^{(-\mu \cdot n)}$$

A0	μ	D	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SOLVER												
0,0404078	0,280454	0,045	0,0404079	0,03052576	0,02306039	0,01742075	0,01316034	0,00994185	0,00751048	0,00567372	0,00428616	0,00323794
0,1010227	0,314159	0,050	0,10102276	0,07378729	0,05389444	0,03936464	0,02875204	0,02100057	0,01533887	0,01120355	0,00818311	0,00597696
0,3648653	0,323972	0,052	0,3648653	0,26389622	0,19086828	0,13804935	0,09984698	0,07221635	0,05223194	0,03777781	0,02732356	0,01976232
1,0587054	0,339533	0,054	1,05870549	0,75390685	0,53685898	0,38229863	0,27223582	0,19385982	0,13804807	0,09830438	0,0700028	0,04984917
3,0063693	0,545284	0,087	3,00636931	1,74272223	1,01021547	0,58559837	0,33945773	0,19677574	0,11406631	0,06612158	0,03832914	0,02221851
3,4310179	0,383717	0,061	3,43101792	2,33763502	1,59268695	1,08513592	0,7393292	0,50372276	0,34319843	0,23382934	0,15931355	0,10854416
4,6016709	0,466258	0,074	4,60167093	2,88683538	1,81104182	1,13614808	0,71275685	0,44714447	0,28051386	0,17597897	0,11039953	0,0692586

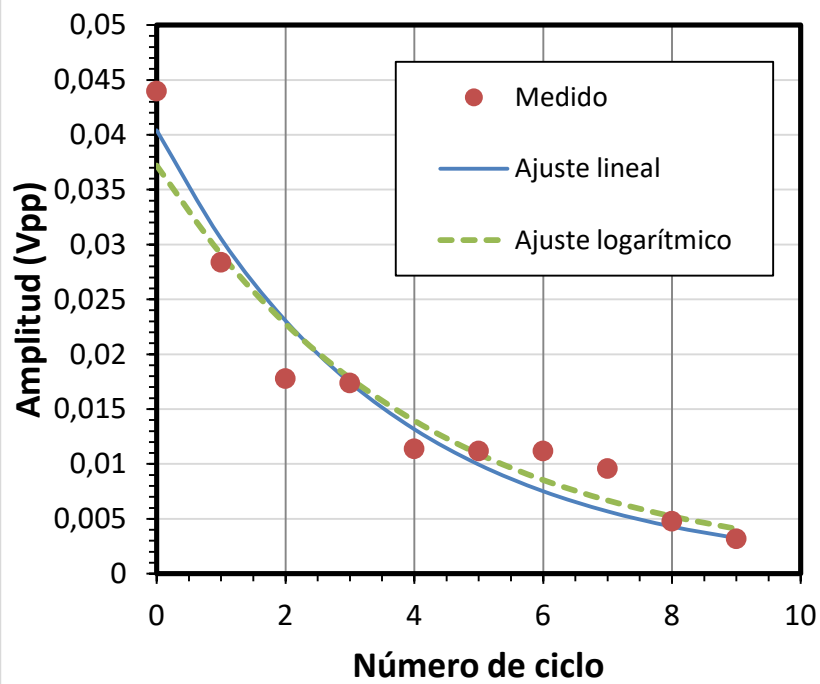
Parámetros variables mediante la función "SOLVER"

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Suma de los cuadrados de las diferencias
1,29E-05	4,52E-06	2,77E-05	4,31E-10	3,1E-06	1,583E-06	1,36E-05	1,54E-05	2,64E-07	1,44E-09	7,90697E-05
8,79E-05	3,51E-08	4,77E-05	3,32E-05	0,000206	0,00013	0,000167	0,000126	6,7E-05	3,57E-05	0,000900461
0,000435	0,000581	0,000632	3,66E-05	6,16E-05	0,000263	0,00015	3,34E-05	4,58E-07	1,8E-05	0,002210515
0,001204	0,003856	5,1E-05	0,000204	0,000264	0,000319	0,000101	0,000188	3,6E-05	3,42E-06	0,006226037
0,320774	0,000299	0,000104	0,004303	0,000422	1,04E-05	0,00211	0,002903	0,001736	0,000772	0,012659464
0,123214	0,213781	0,200089	0,02727	0,067252	0,0695497	0,033562	0,005451	0,001546	0,000131	0,74184435
0,130806	0,508604	0,035705	0,112996	0,097817	0,0429088	0,014524	0,000255	0,000924	0,000115	0,94465447

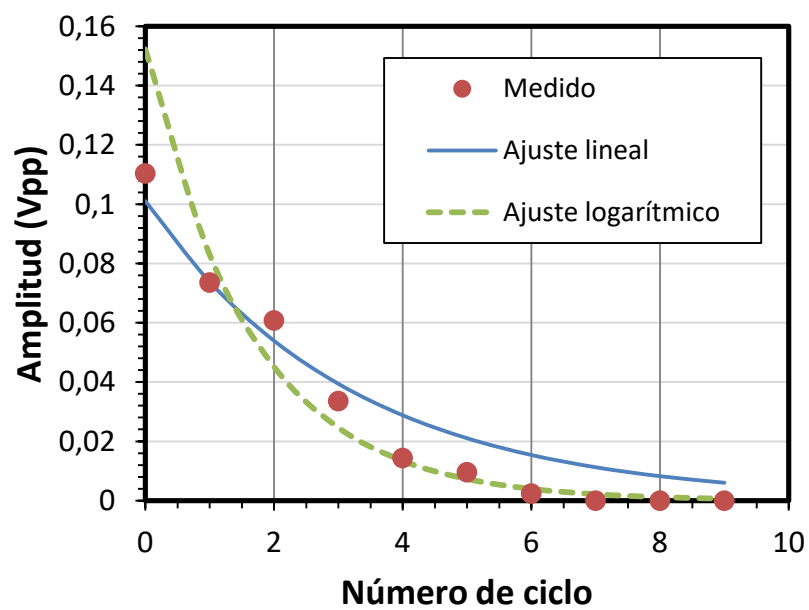
Se minimiza mediante la función "SOLVER"

$$[A_n(\text{Calculada}) - A_n(\text{Laboratorio})]^2$$

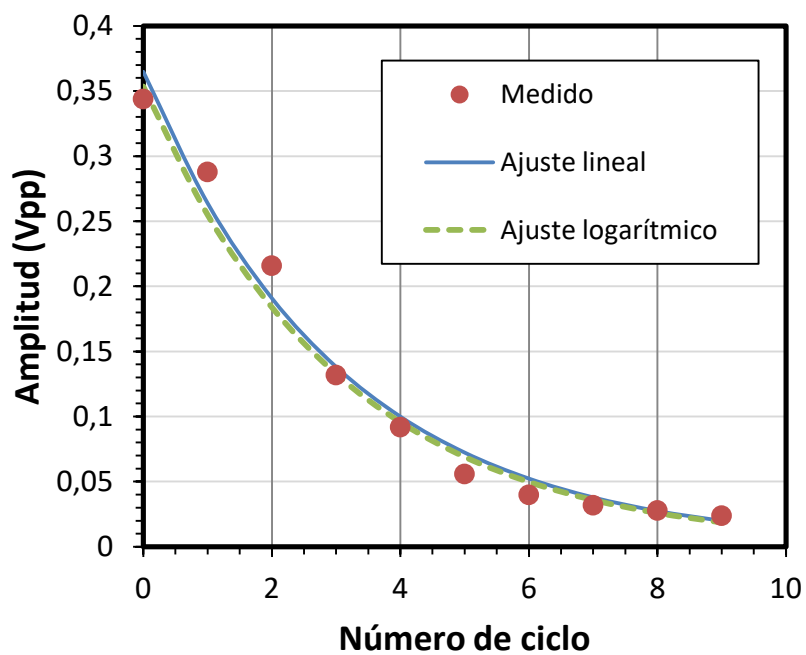
1



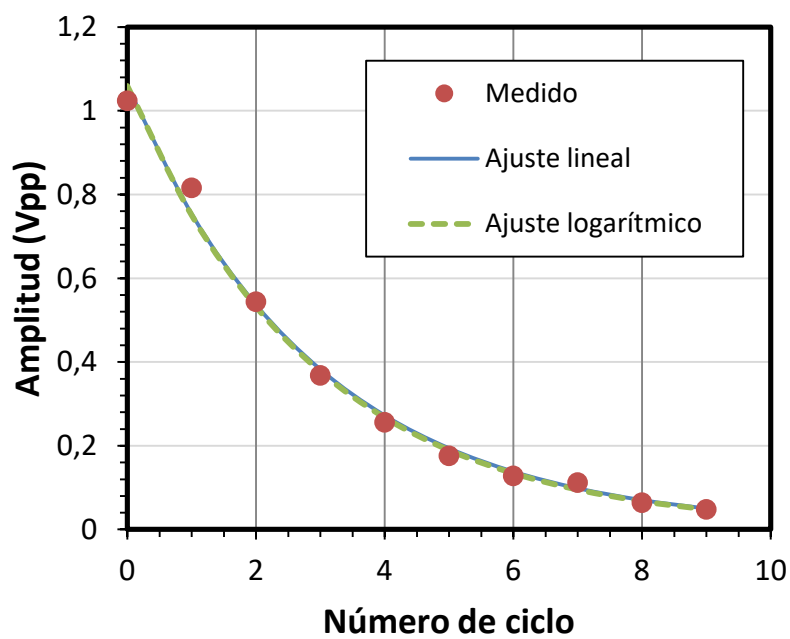
2



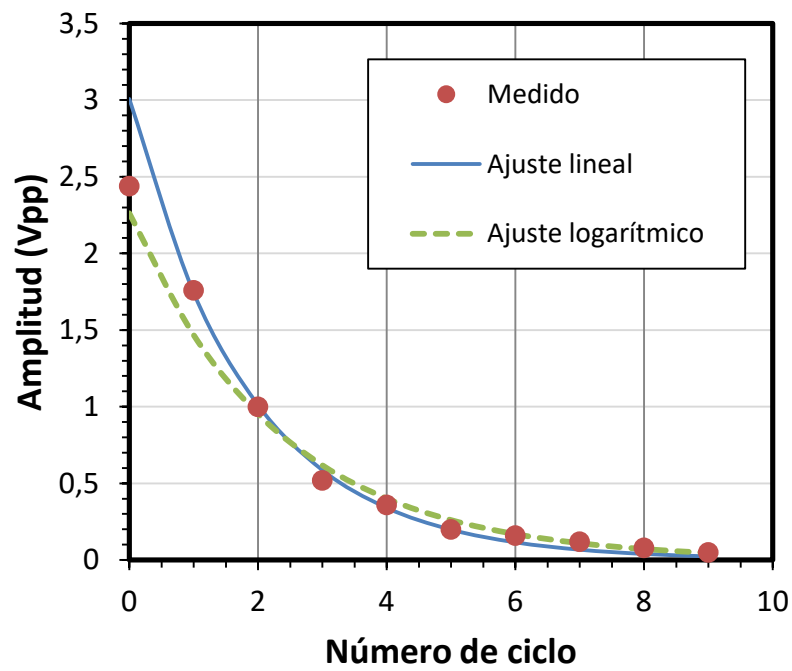
3



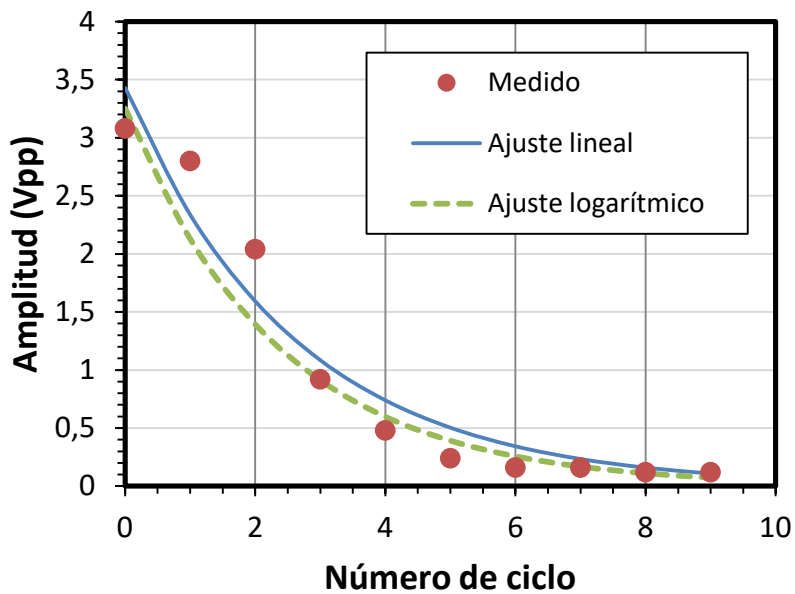
4

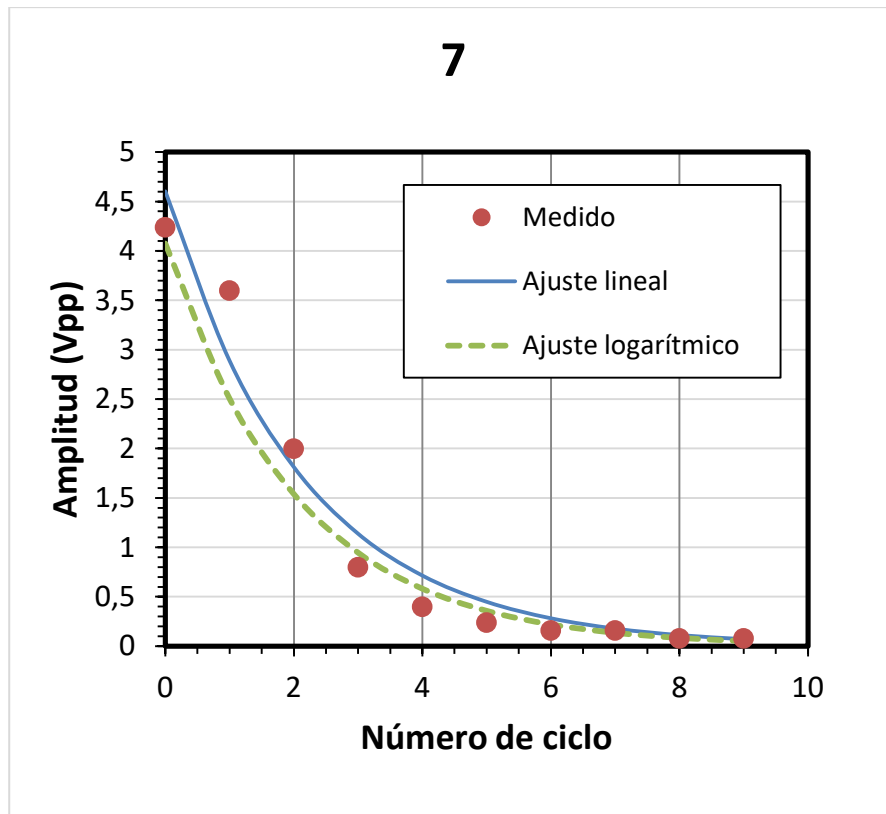


5



6





- Módulo de corte G vs deformación de corte γ

$$\gamma_r = 8,58E-04$$

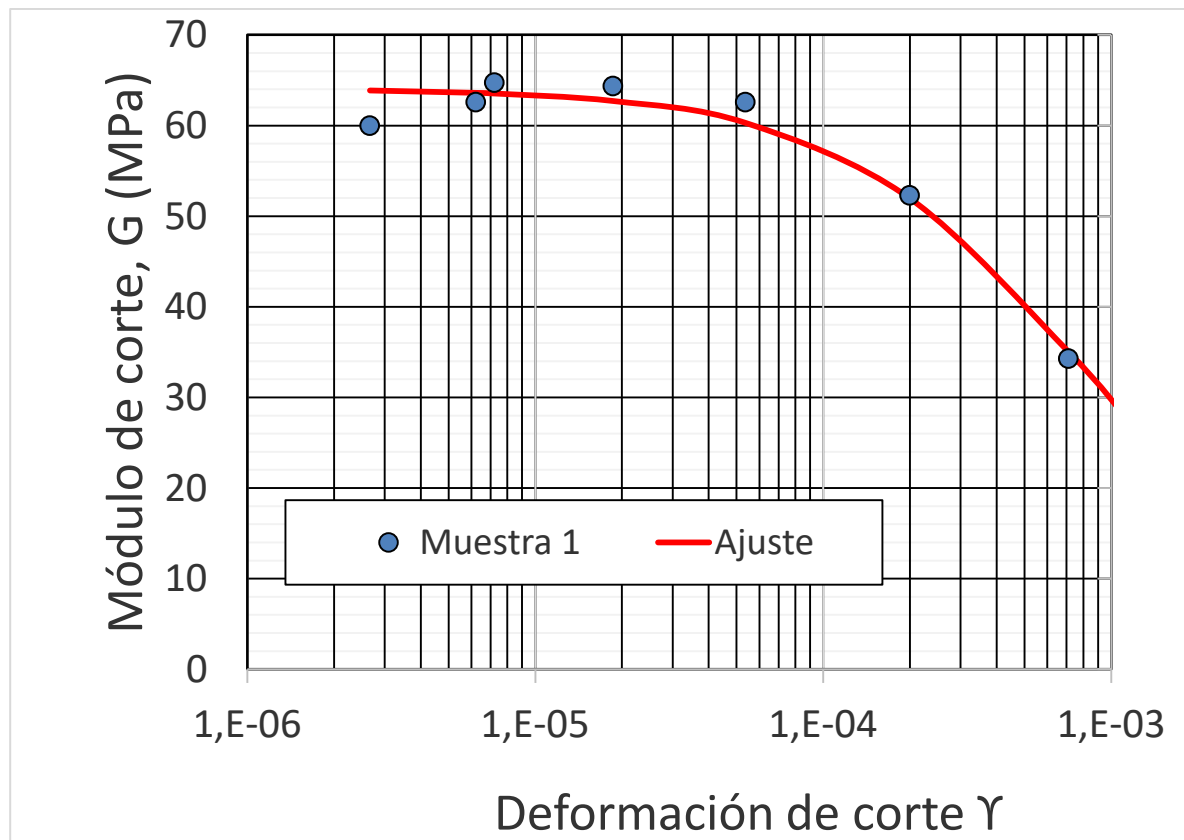
Parámetros

G0 (MPa)=	64,1
$\gamma_{0,7}$=	3,30E-04

Parámetros variables
mediante la función"
SOLVER"

Medidas			
Deformación de corte	Módulo G (MPa)	Módulo calculado	Dif ²
2,7E-06	60	64	14,840
6,2E-06	63	64	0,983
7,2E-06	65	64	1,516
1,9E-05	64	63	2,829
5,4E-05	63	60	5,387
2,0E-04	52	52	0,131
7,1E-04	34	35	0,520
1,2E-03	25	26	1,193
2,4E-03	18	17	1,442
Suma			28,841

Se minimiza
mediante la
función" SOLVER"



- Factor de amortiguamiento D vs Deformación de corte γ

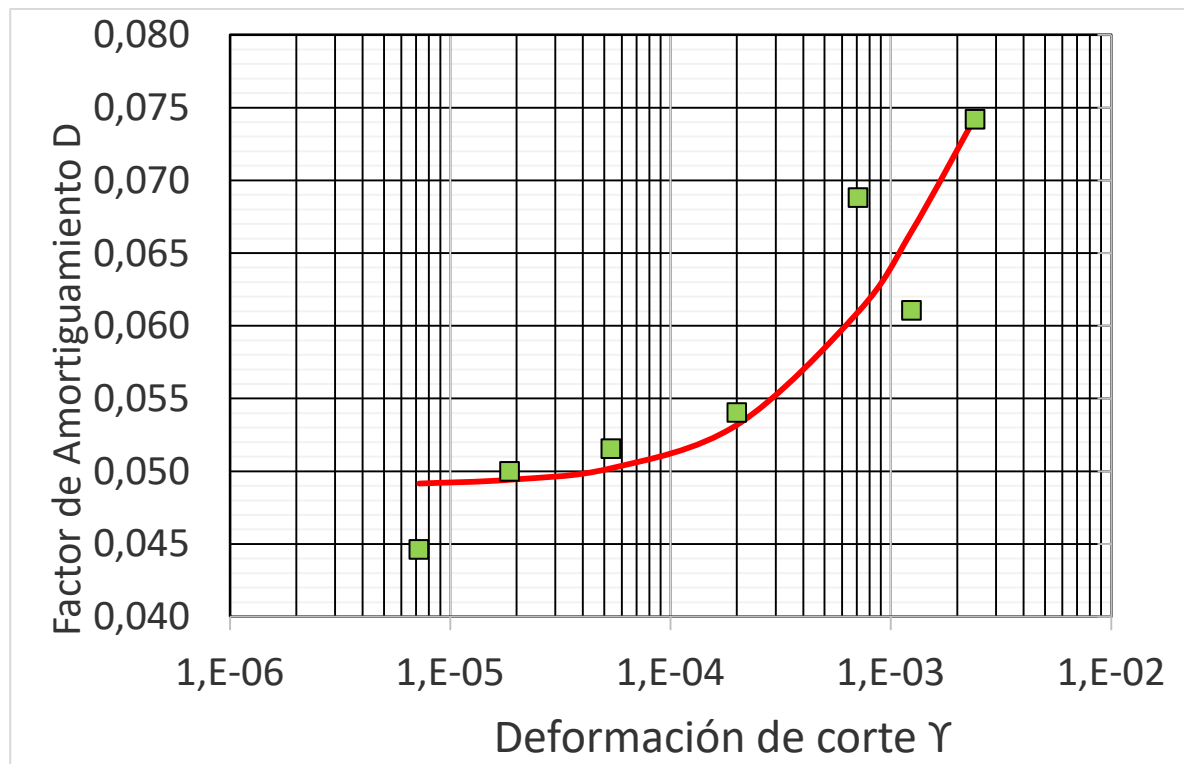
○ Poucell (2016)

Medidas			
Deformación de corte	D	D calculado	Dif^2
$7,2 E-06$	0,045	$4,9 E-02$	$2,0397 E-05$
$1,9 E-05$	0,050	$4,9 E-02$	$3,4232 E-07$
$5,4 E-05$	0,052	$5,0 E-02$	$1,8489 E-06$
$2,0 E-04$	0,054	$5,3 E-02$	$7,3735 E-07$
$7,1 E-04$	0,069	$6,1 E-02$	$6,1943 E-05$
$1,2 E-03$	0,061	$6,6 E-02$	$2,9406 E-05$
$2,4 E-03$	0,074	$7,4 E-02$	$2,1214 E-08$
Suma			0,00011435

Parámetros	$D_0 = 0,049$
	$D_{max} = 0,060$

Parámetros variables mediante la función "SOLVER"

Se minimiza mediante la función "SOLVER"



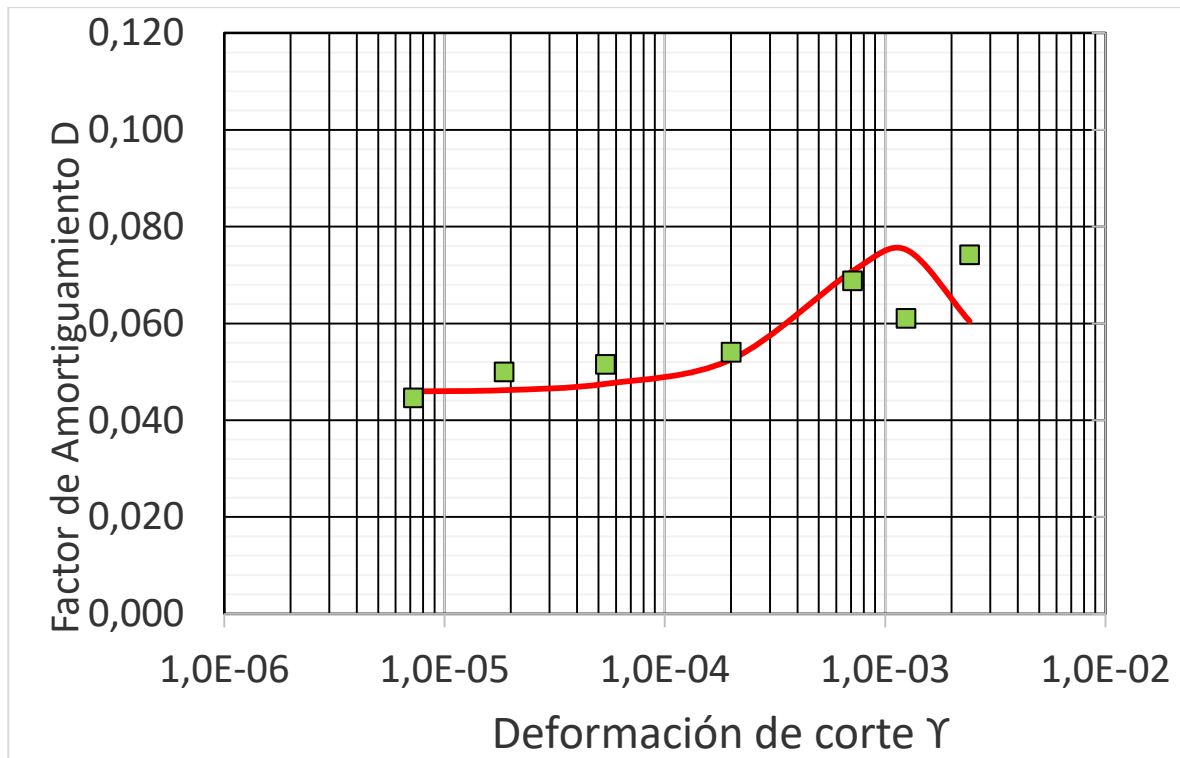
- Ratio de amortiguamiento del material (Assimaki, Kaurel, Whittle, 2000):

Parámetros

C= -11,672	Medidas						
C1= 7,823	Deformación de corte	D	G(γ) (MPa)	τ (MPa)	D calculado	Dif^2	
C2= 31,756	7,2E-06	0,045	64	4,61E-04	4,6E-02	1,8218E-06	
Dmax 0,000	1,9E-05	0,050	64	1,18E-03	4,6E-02	1,4192E-05	
	5,4E-05	0,052	64	3,41E-03	4,8E-02	1,6232E-05	
	2,0E-04	0,054	63	1,25E-02	5,3E-02	2,1363E-06	
	7,1E-04	0,069	60	4,29E-02	7,1E-02	3,9482E-06	
	1,2E-03	0,061	52	6,46E-02	7,5E-02	0,00020188	
	2,4E-03	0,074	35	8,47E-02	6,0E-02	0,00018823	
	Suma						0,00042844

Parámetros variables mediante la función "SOLVER"

Se minimiza mediante la función "SOLVER"

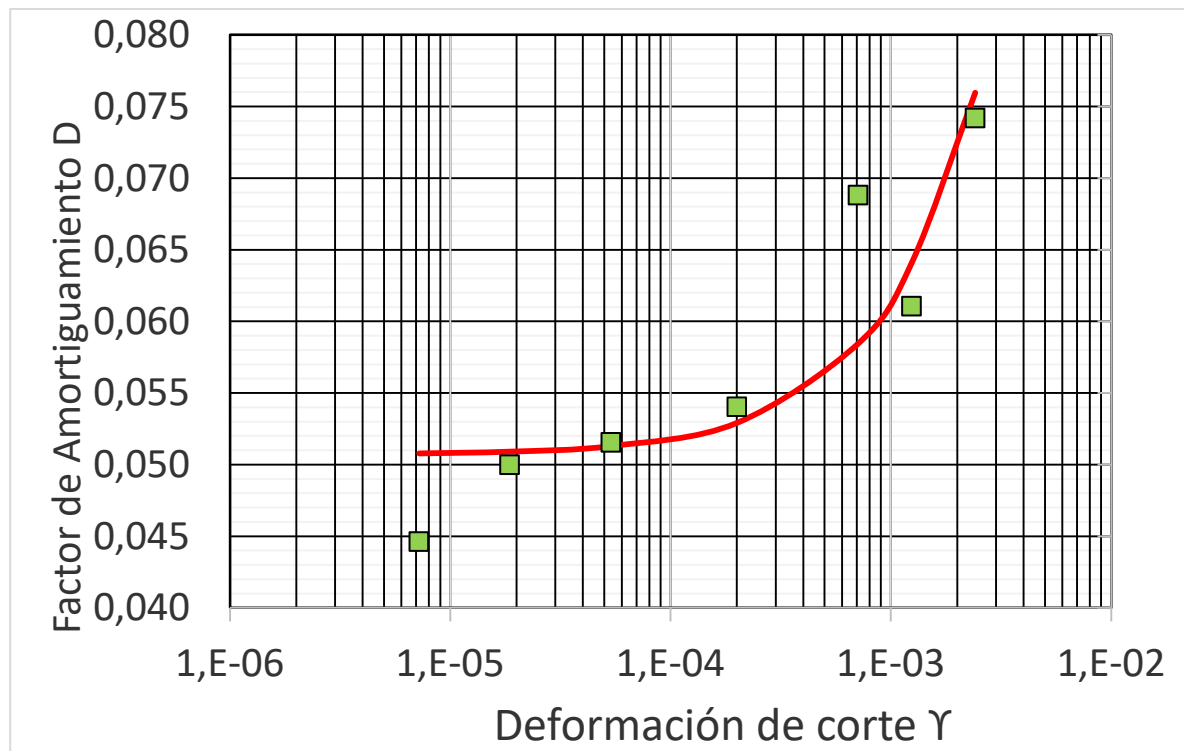


- Amortiguamiento histerético en modelos de pequeña tensión de rigidez (Brinkgreve, Kappert, Bonnier, 2017):

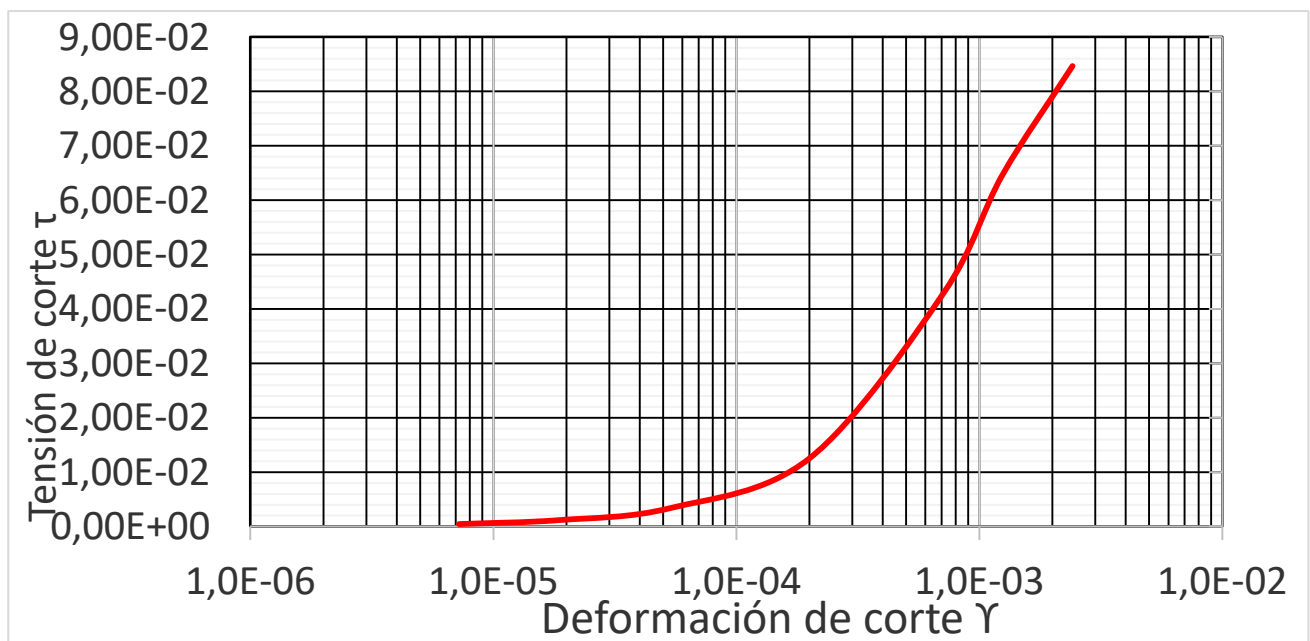
Parámetros	Medidas					
	Deformación de corte	D	Es (MPa)	ED (MPa)	D calculado	Dif^2
a= 0,017	7,2E-06	0,045	1,67E-09	1,68E-12	5,1E-02	3,7612E-05
Dmin 0,051	1,9E-05	0,050	1,11E-08	2,89E-11	5,1E-02	8,0151E-07
	5,4E-05	0,052	9,22E-08	6,90E-10	5,1E-02	7,7004E-08
	2,0E-04	0,054	1,27E-06	3,52E-08	5,3E-02	1,3013E-06
	7,1E-04	0,069	1,56E-05	1,52E-06	5,8E-02	0,00010767
	1,2E-03	0,061	4,65E-05	7,83E-06	6,4E-02	9,0268E-06
	2,4E-03	0,074	1,66E-04	5,28E-05	7,6E-02	3,1054E-06
					Suma	0,00015959

Parámetros variables mediante la función "SOLVER"

Se minimiza mediante la función "SOLVER"



- Tensión de corte τ vs Deformación de corte γ , mediante método de Ratio de amortiguamiento del material:



ANEXO C: MUESTRA 2, HUMEDAD 10%

- Humedad teórica 10%
- Grado de saturación teórico 41,365%

Muestra	2
Densidad seca (Mg/m³)	1,65
Humedad (%)	10,14
Jm (kgm²)	0,0026
D (m)	0,038
L(m)	0,076
Kacc [(m/s²)/V]	6,5
Ra (m)	0,051
Densidad (kg/m³)	1817,332
Volumen (m³)	8,62E-05
Masa (kg)	0,157
Js(kgm²)	2,83E-05
K (MPa s²)	0,038
kdef (1/V)	0,269

- Resultados de laboratorio:

Día y Hora inicio consolidación	Día y hora de aplicación de carga de corte	Tiempo desde aplicación de la carga (hrs)	Valor excitación (Vpp)	Fr resonancia (Hz)	Módulo G (MPa)	Respuesta acc (Vpp)	Def. de corte	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
7-6-16 10:50	6-6-16 20:00	14:50:00	0,0114	35,7	48,6	0,0292	6,2E-06										
			0,0352	35,46	47,9	0,0488	1,0E-05										
			0,0422	35,22	47,3	0,0548	1,2E-05										
			0,0856	34,48	45,3	0,0912	2,1E-05	0,044	0,0784	0,0592	0,04	0,0352	0,0352	0,0304	0,0304	0,0304	
			0,148	34,47	45,3	0,136	3,1E-05	0,144	0,124	0,112	0,096	0,052	0,04	0,032	0,024	0,024	0,024
			0,168	33,66	43,2	0,14	3,3E-05	0,156	0,124	0,109	0,1	0,076	0,068	0,068	0,044	0,044	0,028
			0,364	32,61	40,5	0,244	6,2E-05	0,264	0,24	0,24	0,176	0,112	0,088	0,064	0,064	0,032	0,032
			0,472	31,26	37,2	0,276	7,6E-05	0,26	0,252	0,2	0,124	0,096	0,068	0,068	0,048	0,048	0,032
			0,48	31,23	37,2	0,296	8,2E-05	0,292	0,2	0,132	0,08	0,056	0,056	0,04	0,032	0,024	0,024
			0,808	29,412	33,0	0,344	1,1E-04	0,368	0,344	0,192	0,12	0,088	0,072	0,064	0,048	0,048	0,032
			1,86	24,195	22,3	0,44	2,0E-04	0,496	0,2	0,112	0,072	0,072	0,064	0,056	0,04	0,04	0,024

- Ajuste logarítmico:

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-3,1236	-2,5459	-2,8268	-3,2189	-3,3467	-3,3467	-3,4933	-3,4933	-3,4933	
-1,9379	-2,0875	-2,1893	-2,3434	-2,9565	-3,2189	-3,4420	-3,7297	-3,7297	-3,7297
-1,8579	-2,0875	-2,2164	-2,3026	-2,5770	-2,6882	-2,6882	-3,1236	-3,1236	-3,5756
-1,3318	-1,4271	-1,4271	-1,7373	-2,1893	-2,4304	-2,7489	-2,7489	-3,4420	-3,4420
-1,3471	-1,3783	-1,6094	-2,0875	-2,3434	-2,6882	-2,6882	-3,0366	-3,0366	-3,4420
-1,2310	-1,6094	-2,0250	-2,5257	-2,8824	-2,8824	-3,2189	-3,4420	-3,7297	-3,7297
-0,9997	-1,0671	-1,6503	-2,1203	-2,4304	-2,6311	-2,7489	-3,0366	-3,0366	-3,4420
-0,7012	-1,6094	-2,1893	-2,6311	-2,6311	-2,7489	-2,8824	-3,2189	-3,2189	

A0	μ	D
0,05935	0,09637	0,01534
0,15319	0,23565	0,03750
0,15781	0,17282	0,02751
0,32619	0,26049	0,04146
0,27754	0,24088	0,03834
0,23233	0,28179	0,04485
0,33458	0,27143	0,04320
0,26391	0,27339	0,04351

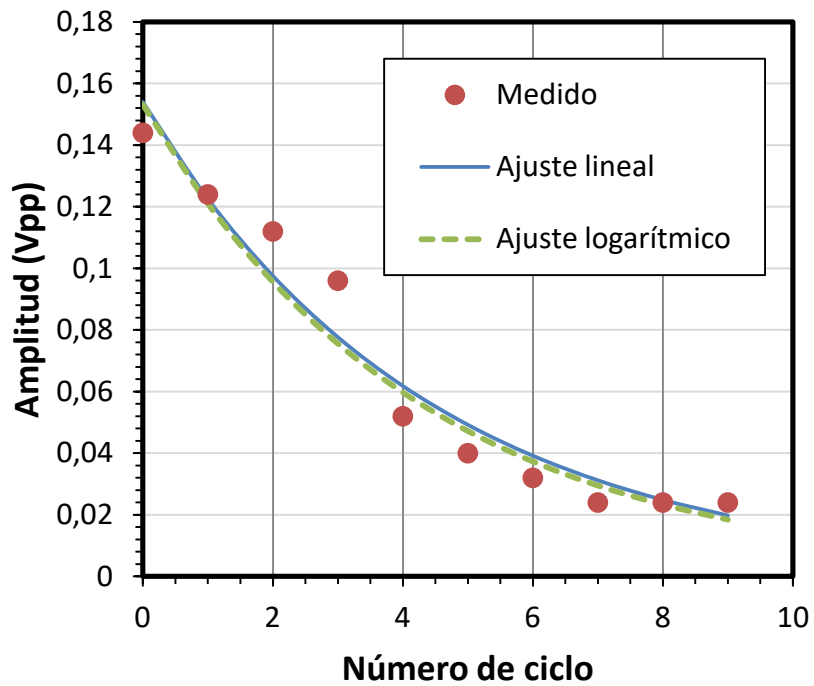
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,05935	0,05389	0,04894	0,04445	0,04036	0,03665	0,03329	0,03023	0,02745	0,02493
0,15319	0,12103	0,09562	0,07555	0,05969	0,04716	0,03726	0,02943	0,02326	0,01837
0,15781	0,13276	0,11169	0,09397	0,07905	0,06651	0,05595	0,04707	0,03960	0,03331
0,32619	0,25139	0,19374	0,14931	0,11507	0,08868	0,06834	0,05267	0,04059	0,03128
0,27754	0,21813	0,17144	0,13474	0,10590	0,08323	0,06541	0,05141	0,04040	0,03176
0,23233	0,17528	0,13224	0,09976	0,07527	0,05678	0,04284	0,03232	0,02438	0,01840
0,33458	0,25505	0,19442	0,14821	0,11298	0,08612	0,06565	0,05004	0,03815	0,02908
0,26391	0,20079	0,15276	0,11622	0,08842	0,06727	0,05118	0,03894	0,02962	0,02254

- Ajuste lineal:

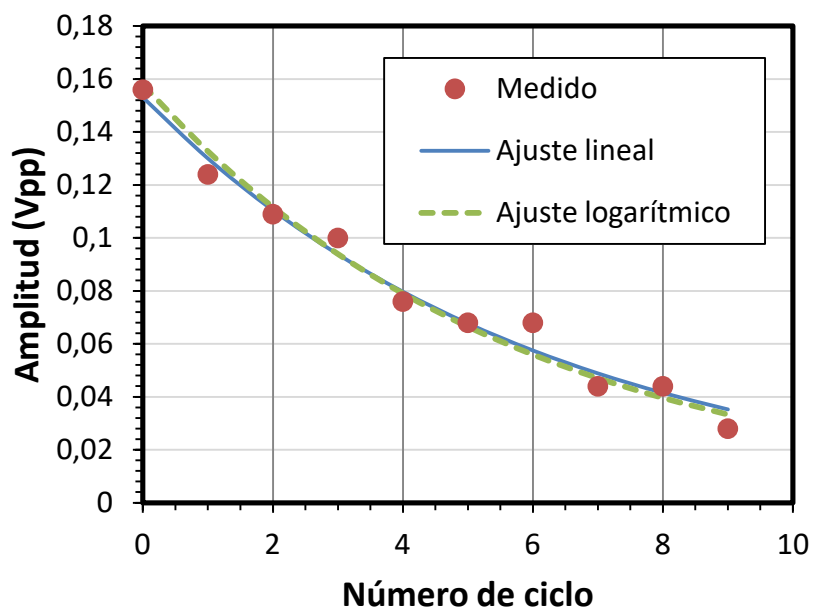
A0	μ	D	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SOLVER												
0,064692276	0,12967838	0,021	0,06469	0,05682	0,04991	0,04384	0,03851	0,03383	0,02971	0,02610	0,02292	0,02014
0,153947664	0,22831202	0,036	0,15395	0,12252	0,09751	0,07761	0,06177	0,04916	0,03912	0,03114	0,02478	0,01972
0,153119542	0,16317069	0,026	0,15312	0,13007	0,11048	0,09385	0,07972	0,06772	0,05752	0,04886	0,04151	0,03526
0,343078718	0,25621341	0,041	0,34308	0,26553	0,20552	0,15907	0,12311	0,09529	0,07375	0,05708	0,04418	0,03419
0,283916645	0,24288801	0,039	0,28392	0,22269	0,17467	0,13700	0,10746	0,08429	0,06611	0,05186	0,04067	0,03190
0,287588471	0,36954796	0,059	0,28759	0,19874	0,13734	0,09491	0,06558	0,04532	0,03132	0,02164	0,01496	0,01034
0,391801874	0,32385335	0,052	0,39180	0,28341	0,20501	0,14829	0,10727	0,07759	0,05613	0,04060	0,02937	0,02124
0,474896686	0,65806421	0,105	0,47490	0,24593	0,12735	0,06595	0,03415	0,01769	0,00916	0,00474	0,00246	0,00127

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Suma de los cuadrados de las diferencias
0,000428	0,000466	8,62E-05	1,48E-05	1,1E-05	1,886E-06	4,73E-07	1,85E-05	5,59E-05	0,000405	0,001487871
9,9E-05	2,18E-06	0,00021	0,000338	9,54E-05	8,388E-05	5,08E-05	5,1E-05	6,11E-07	1,83E-05	0,000949125
8,3E-06	3,68E-05	2,2E-06	3,78E-05	1,38E-05	7,901E-08	0,00011	2,37E-05	6,22E-06	5,27E-05	0,000291343
0,006253	0,000652	0,001189	0,000287	0,000124	5,31E-05	9,51E-05	4,79E-05	0,000148	4,81E-06	0,002600496
0,000572	0,000859	0,000642	0,000169	0,000131	0,0002653	3,56E-06	1,49E-05	5,37E-05	9,48E-09	0,002710382
1,95E-05	1,6E-06	2,85E-05	0,000222	9,19E-05	0,000114	7,54E-05	0,000107	8,18E-05	0,000187	0,000928718
0,000567	0,003671	0,000169	0,000801	0,000371	3,129E-05	6,2E-05	5,48E-05	0,000347	0,000116	0,006189283
0,000445	0,002109	0,000236	3,66E-05	0,001432	0,002145	0,002194	0,001243	0,00141	0,000517	0,011767612

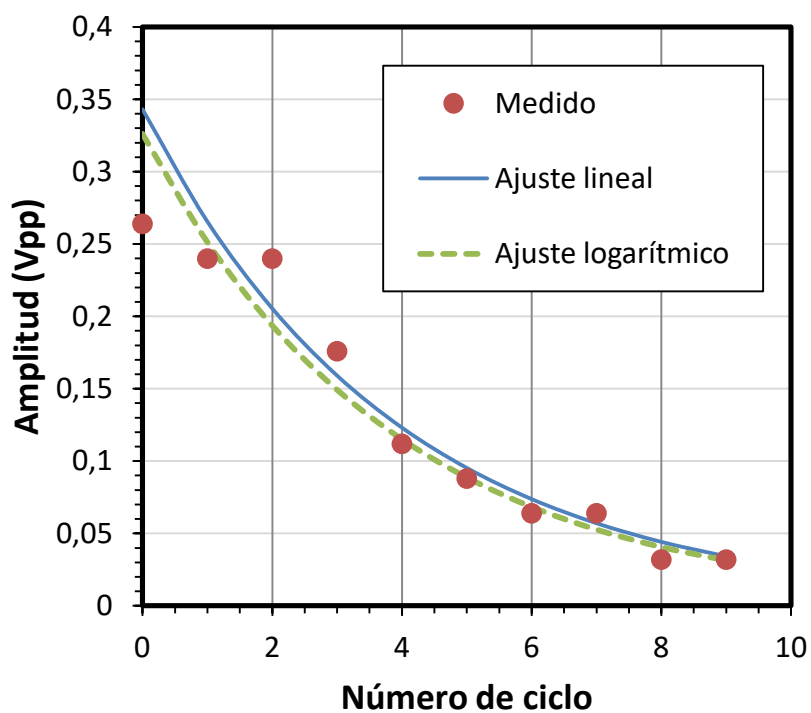
1



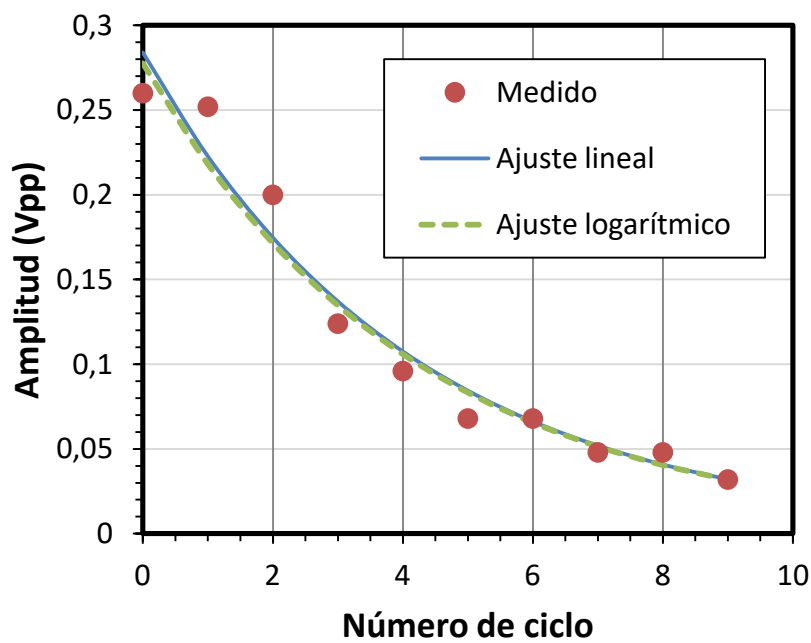
2



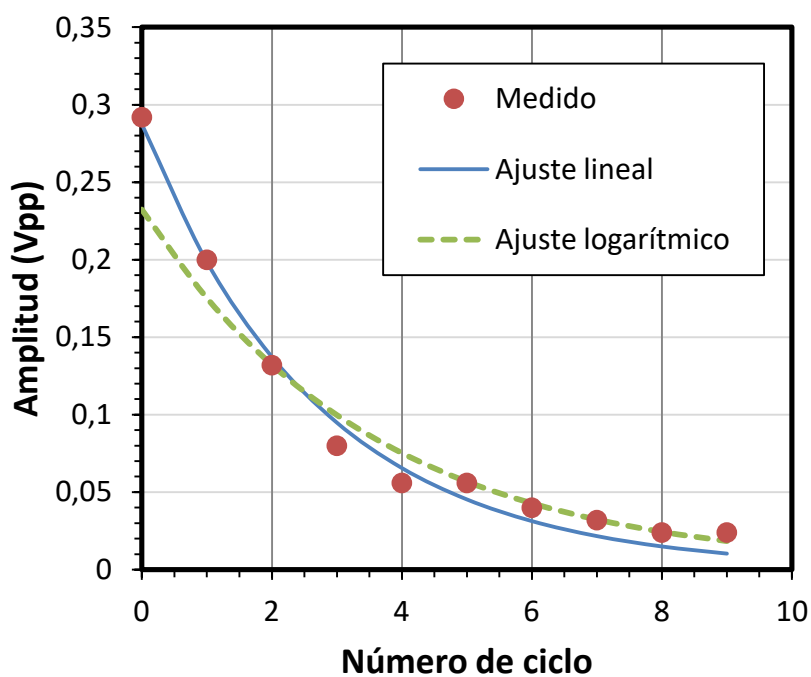
3



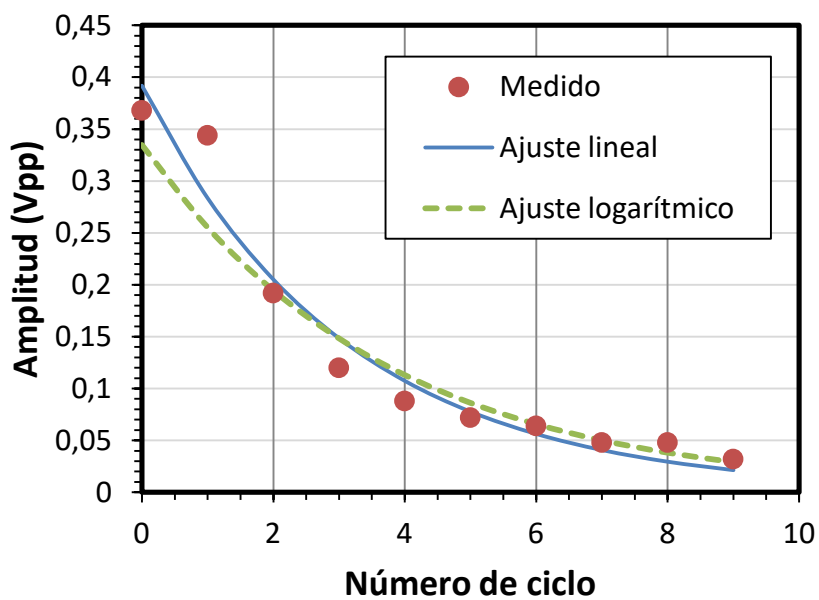
4

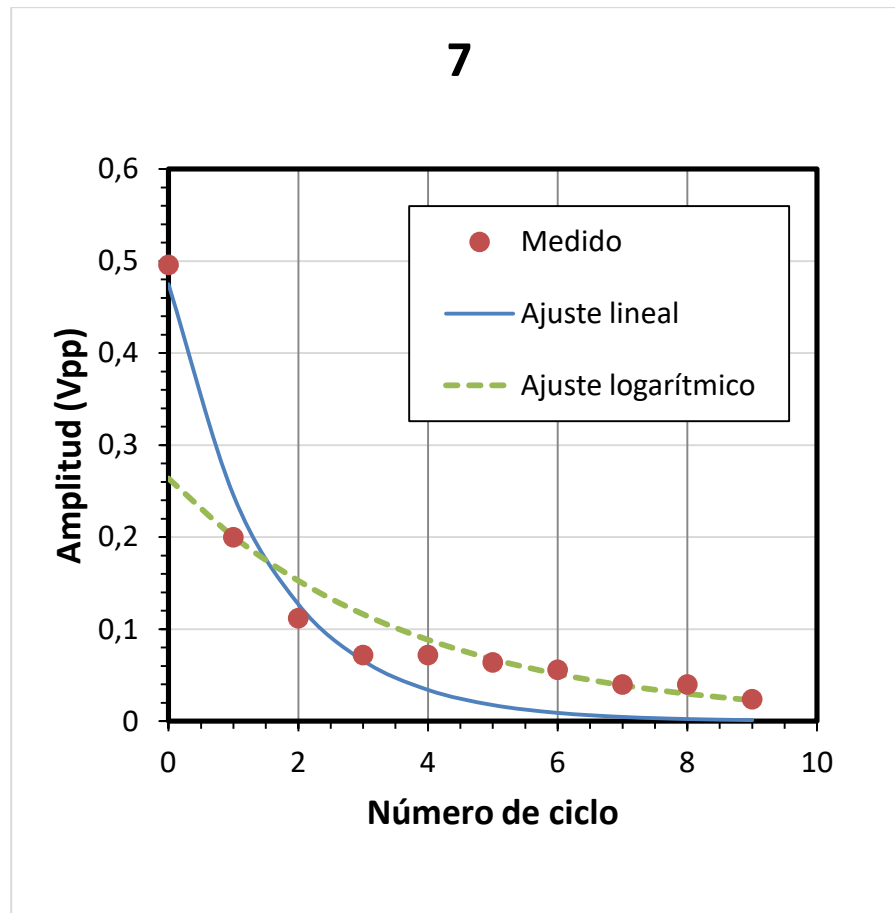


5



6



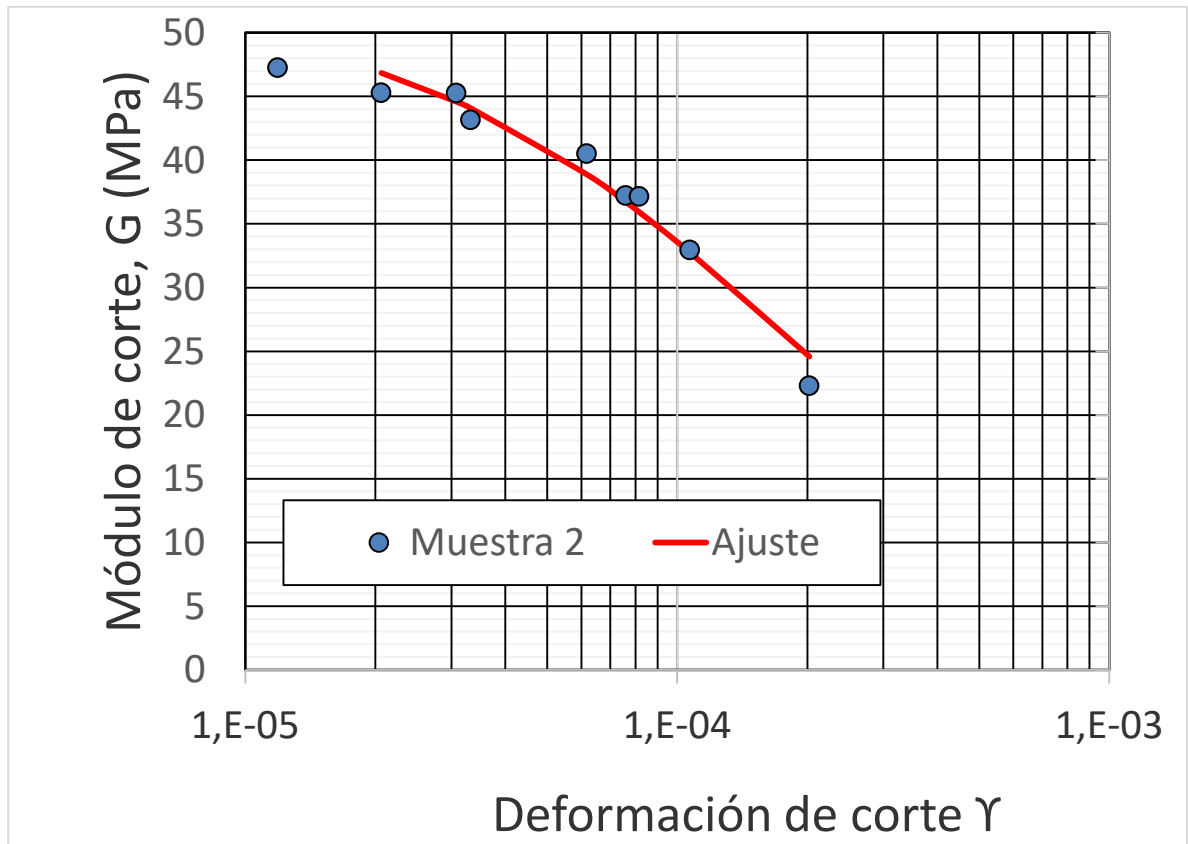


- Módulo de corte G vs deformación de corte γ

$$\gamma_r = 1,80E-04$$

Parámetros

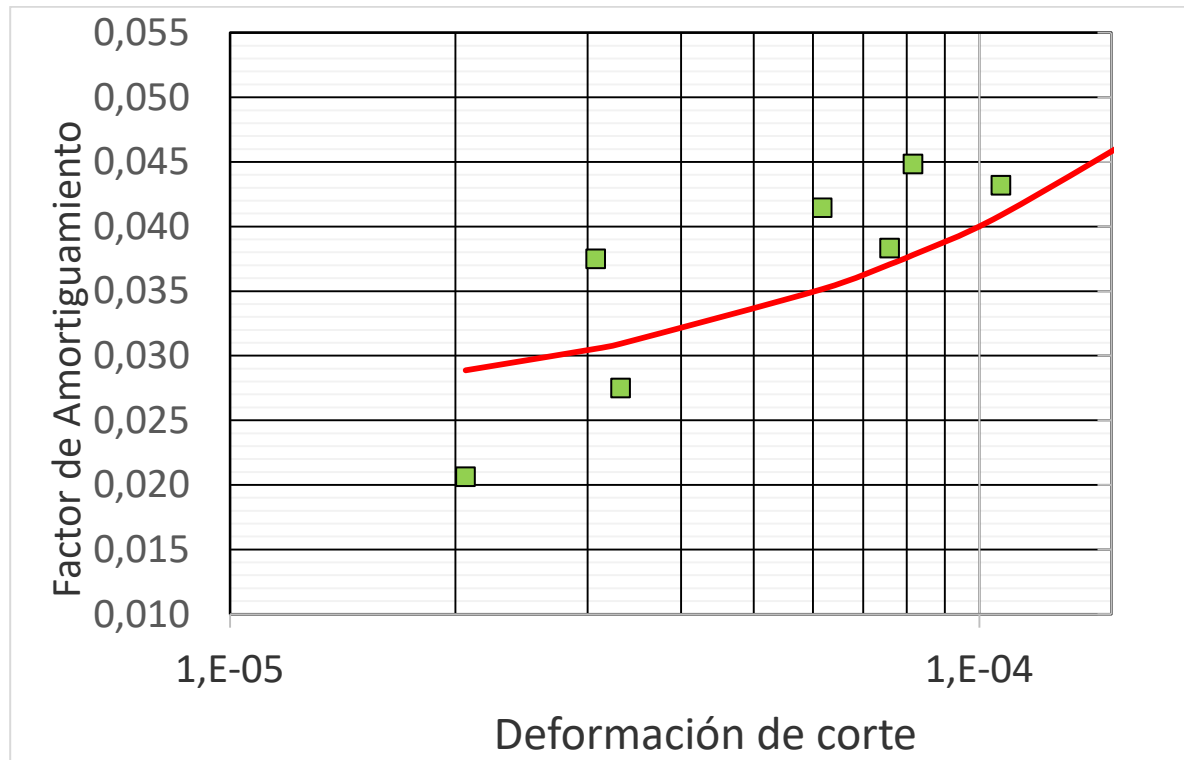
		Medidas		Módulo calculado	Dif^2
		Deformación de corte	Módulo G (MPa)		
G0 (MPa)=	52,2	2,1E-05	45	47	2,359
$\gamma_{0,7}$=	6,93E-05	3,1E-05	45	45	0,483
		3,3E-05	43	44	0,802
		6,2E-05	41	39	2,714
		7,6E-05	37	37	0,278
		8,2E-05	37	36	1,564
		1,1E-04	33	33	0,049
		2,0E-04	22	25	5,185
				Suma	13,435



- Factor de amortiguamiento D vs Deformación de corte γ

○ Poucell (2016)

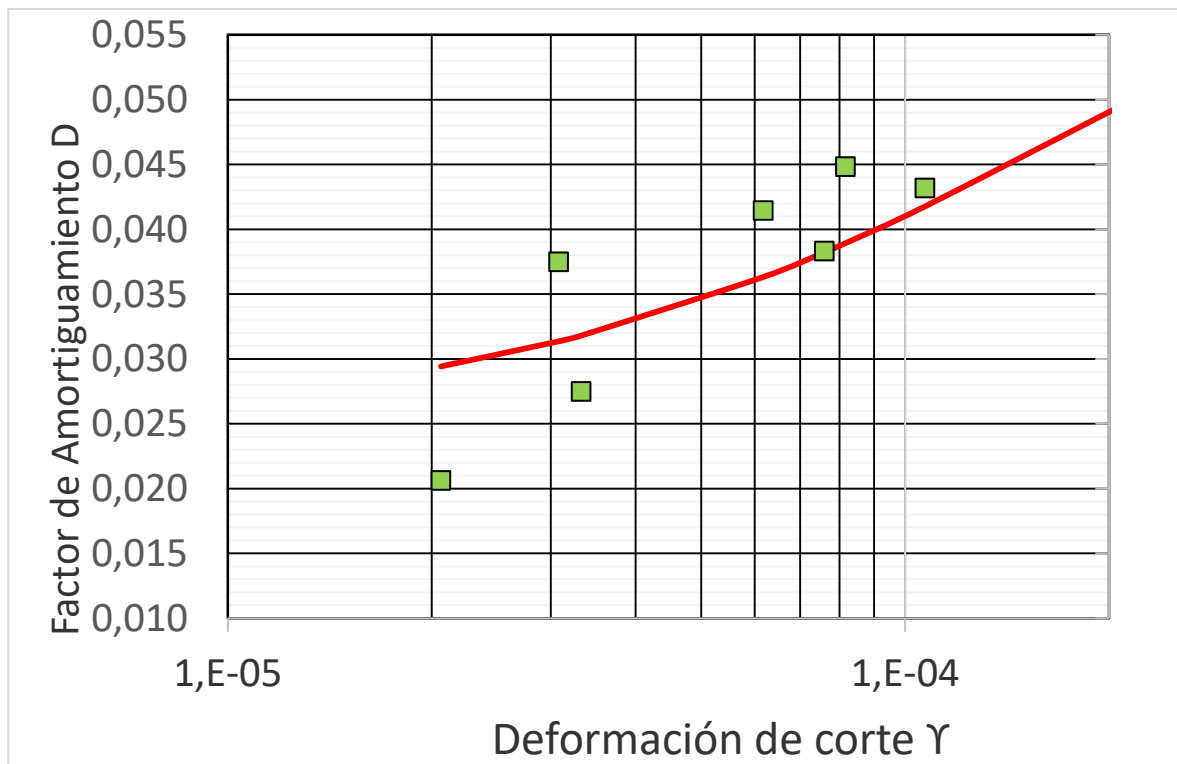
		Medidas			
		Deformación de corte	D	D calculado	Dif ²
Parámetros		2,1E-05	0,021	2,9E-02	6,7938E-05
		3,1E-05	0,038	3,1E-02	4,8367E-05
		3,3E-05	0,02750536	3,1E-02	1,1796E-05
	D0= 0,025	6,2E-05	0,0414584	3,5E-02	3,966E-05
	Dmax= 0,102	7,6E-05	0,03833691	3,7E-02	1,5793E-06
		8,2E-05	0,04484785	3,8E-02	4,9516E-05
		1,1E-04	0,04319868	4,1E-02	5,3563E-06
		2,0E-04	0,04351078	5,0E-02	4,5073E-05
				Suma	0,00026929



- Ratio de amortiguamiento del material (Assimaki, Kaurel, Whittle, 2000):

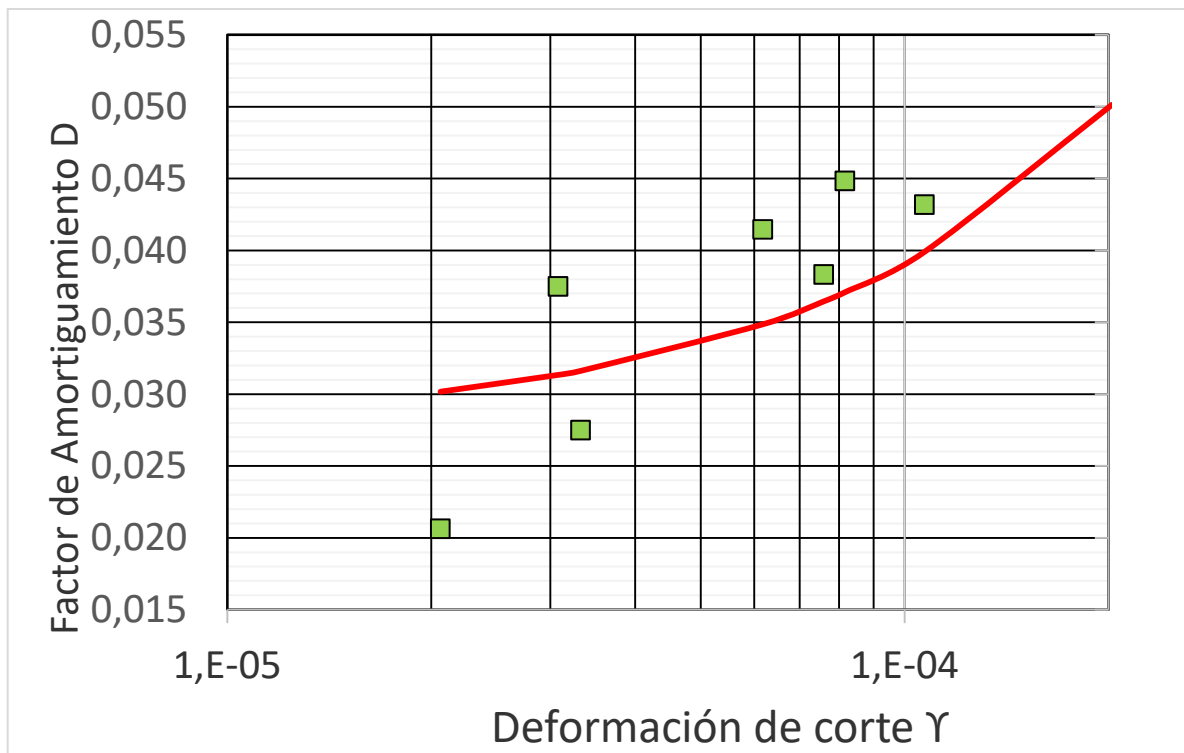
Parámetros

C=	0,013	Medidas					
C1=	1,005	Deformación de corte	D	G(γ) (MPa)	τ (MPa)	D calculado	Dif^2
C2=	26,888	2,1E-05	0,021	47	9,67E-04	2,9E-02	7,7143E-05
Dmax	0,073	3,1E-05	0,03750448	45	1,37E-03	3,1E-02	3,779E-05
		3,3E-05	0,02750536	44	1,47E-03	3,2E-02	1,8431E-05
		6,2E-05	0,0414584	39	2,40E-03	3,6E-02	2,6412E-05
		7,6E-05	0,03833691	37	2,79E-03	3,8E-02	1,1817E-08
		8,2E-05	0,04484785	36	2,93E-03	3,9E-02	3,4993E-05
		1,1E-04	0,04319868	33	3,50E-03	4,2E-02	2,0656E-06
		2,0E-04	0,04351078	25	4,97E-03	4,9E-02	3,2176E-05
						Suma	0,00022902

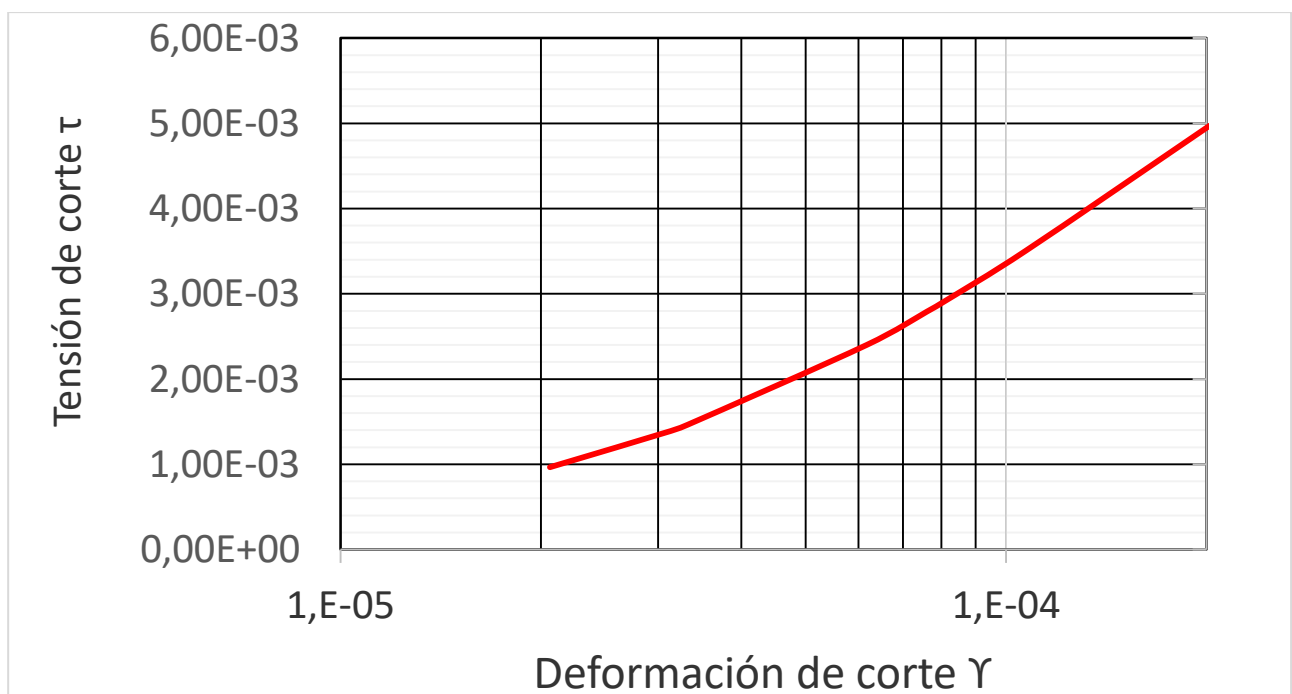


- Amortiguamiento histeretico en modelos de pequeña tensión de rigidez (Brinkgreve, Kappert, Bonnier, 2017):

Parámetros		Medidas					
		Deformaciónd e corte	D	Es (MPa)	ED (MPa)	D calculado	Dif^2
a=	0,038	2,1E-05	0,021	1,10E-08	3,31E-10	3,0E-02	9,0693E-05
Dmin	0,028	3,1E-05	0,03750448	2,43E-08	1,09E-09	3,1E-02	3,811E-05
		3,3E-05	0,02750536	2,83E-08	1,37E-09	3,2E-02	1,6866E-05
		6,2E-05	0,0414584	9,62E-08	8,57E-09	3,5E-02	4,3639E-05
		7,6E-05	0,03833691	1,45E-07	1,58E-08	3,6E-02	3,5391E-06
		8,2E-05	0,04484785	1,67E-07	1,95E-08	3,7E-02	6,0198E-05
		1,1E-04	0,04319868	2,82E-07	4,30E-08	4,0E-02	1,0884E-05
		2,0E-04	0,04351078	9,61E-07	2,70E-07	5,0E-02	4,3937E-05



- Tensión de corte τ vs Deformación de corte γ , mediante método de Ratio de amortiguamiento del material:



ANEXO D: MUESTRA 3, HUMEDAD 20%

- Humedad teórica 20%
- Grado de saturación teórico 82,730%

Muestra	3
Densidad seca (Mg/m³)	1,65
Humedad (%)	19,31
Jm (kgm²)	0,0026
D (m)	0,038
L(m)	0,076
Kacc [(m/s²)/V]	6,5
Ra (m)	0,051
Densidad (kg/m³)	1968,648
Volumen (m³)	8,62E-05
Masa (kg)	0,170
Js(kgm²)	3,06E-05
K (MPa s²)	0,038
k_{def} (1/V)	0,269

- Resultados de laboratorio:

Día y Hora inicio consolidación	Día y hora de aplicación de carga de corte	Tiempo desde aplicación de la carga (hrs)	Valor excitación (Vpp)	Frecuencia resonancia (Hz)	Módulo G (MPa)	Respuesta acc (Vpp)	Def. de corte	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
7-6-16 10:50	6-6-16 20:00	14:50:00	0,928	17,016	11,0	0,592	5,5E-04	0,496	0,4	0,32	0,272	0,192	0,128				
			1,94	15,957	9,7	0,896	9,5E-04	0,992	0,688	0,528	0,288	0,176	0,128				
			4,36	13,761	7,2	1,58	2,2E-03	1,64	1,52	0,8	0,4	0,16					
			5,4	12,69	6,1	1,8	3,0E-03	2	1,36	0,68	0,32	0,2					
			8	11,718	5,2	2,14	4,2E-03	3,28	1,44	0,48	0,32	0,24					
			9,12	9,999	3,8	2,6	7,0E-03	2,4	1,2	0,4	0,24						

- Ajuste logarítmico:

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-0,70117935	-0,91629073	-1,13943428	-1,30195321	-1,65025991	-2,05572502				
-0,00803217	-0,37396644	-0,638659	-1,2447948	-1,73727128	-2,05572502				
0,49469624	0,41871033	-0,22314355	-0,91629073	-1,83258146					
0,69314718	0,3074847	-0,38566248	-1,13943428	-1,60943791					
1,18784342	0,36464311	-0,73396918	-1,13943428	-1,42711636					
0,87546874	0,18232156	-0,91629073	-1,42711636						

A0	μ	D
0,52650918	0,26106156	0,04154924
1,05866596	0,42670042	0,06791148
2,19501628	0,59895565	0,09532675
2,18942133	0,60520892	0,09632199
2,71066159	0,6733997	0,10717489
2,4098173	0,80063676	0,1274253

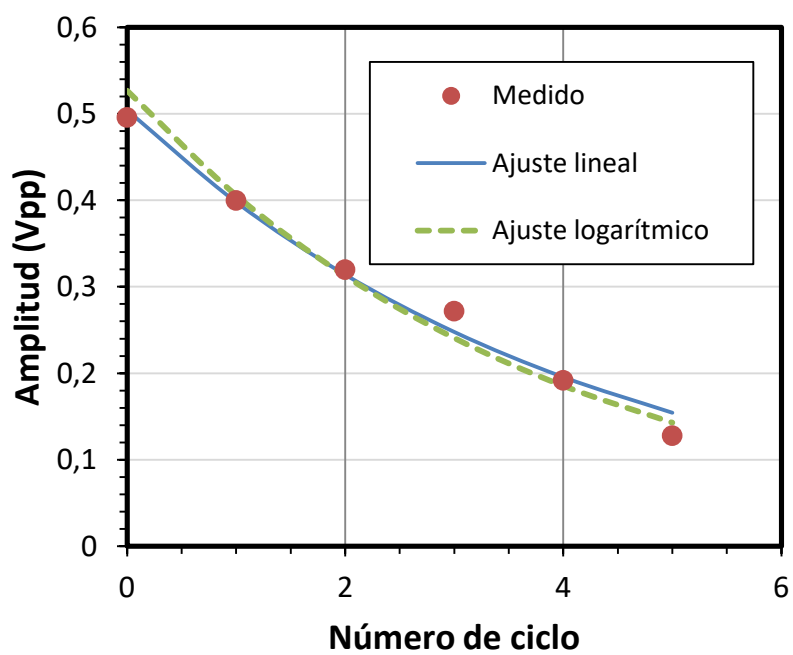
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,52650918	0,40553501	0,31235665	0,24058756	0,18530859	0,14273089				
1,05866596	0,69094792	0,45095341	0,29431883	0,19208984	0,12536918				
2,19501628	1,20590921	0,66250854	0,36397231	0,19996096					
2,18942133	1,19533724	0,65260675	0,35629741	0,19452426					
2,71066159	1,38236118	0,70496533	0,35951249	0,18334126					
2,4098173	1,08211145	0,48591451	0,21819648						

- Ajuste lineal:

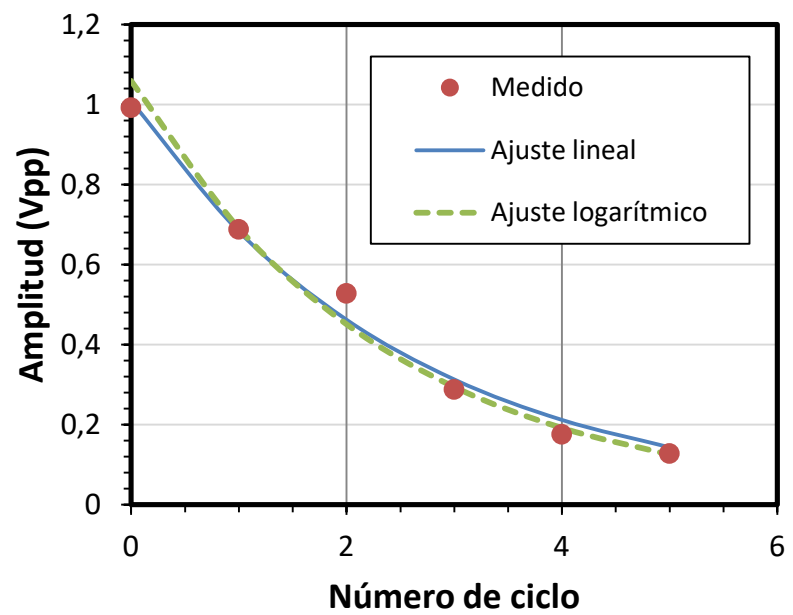
A0	μ	D	0	1	2	3	4	5	6	7	8
SOLVER											
0,504194738	0,23699173	0,038	0,50419474	0,39780855	0,31387007	0,2476428	0,19538963	0,15416199			
1,008438783	0,39018667	0,062	1,00843878	0,68264297	0,46210185	0,31281084	0,2117512	0,14334085			
1,800352506	0,41679943	0,066	1,80035251	1,18670796	0,78222224	0,51560422	0,33986213				
2,059469627	0,53644534	0,085	2,05946963	1,20442606	0,70437656	0,4119359	0,24090976				
3,280159982	0,84592615	0,135	3,28015998	1,4077125	0,60413348	0,25926975	0,11126813				
2,42076294	0,78196507	0,124	2,42076294	1,1075138	0,50669431	0,23181574					

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Suma de los cuadrados de las diferencias
6,72E-05	4,8E-06	3,76E-05	0,000593	1,15E-05	0,0006844					0,001398745
0,00027	2,87E-05	0,004343	0,000616	0,001278	0,0002353					0,006770565
0,025713	0,111084	0,000316	0,013364	0,03235						0,182827284
0,003537	0,024203	0,000594	0,008452	0,001674						0,038459924
2,56E-08	0,001042	0,015409	0,003688	0,016572						0,036711688
0,000431	0,008554	0,011384	6,7E-05							0,020435456

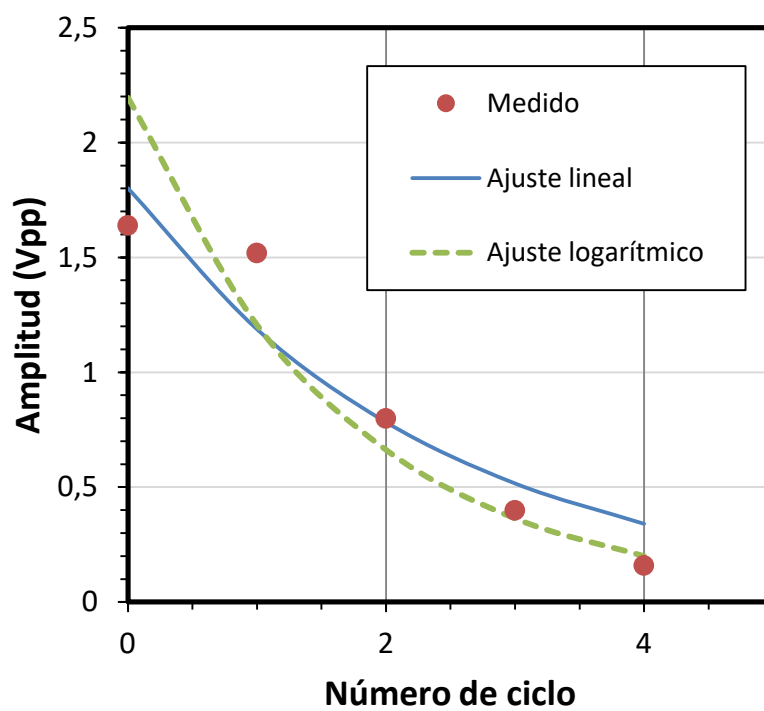
1



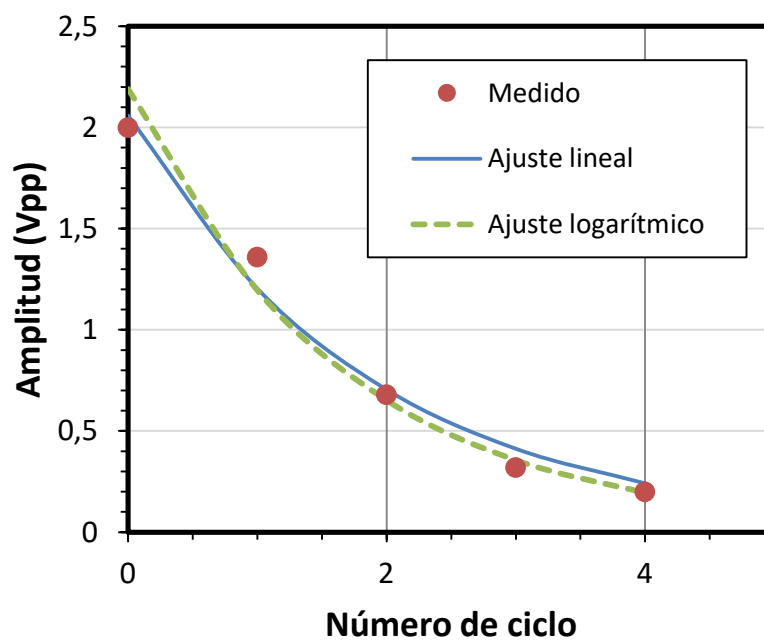
2



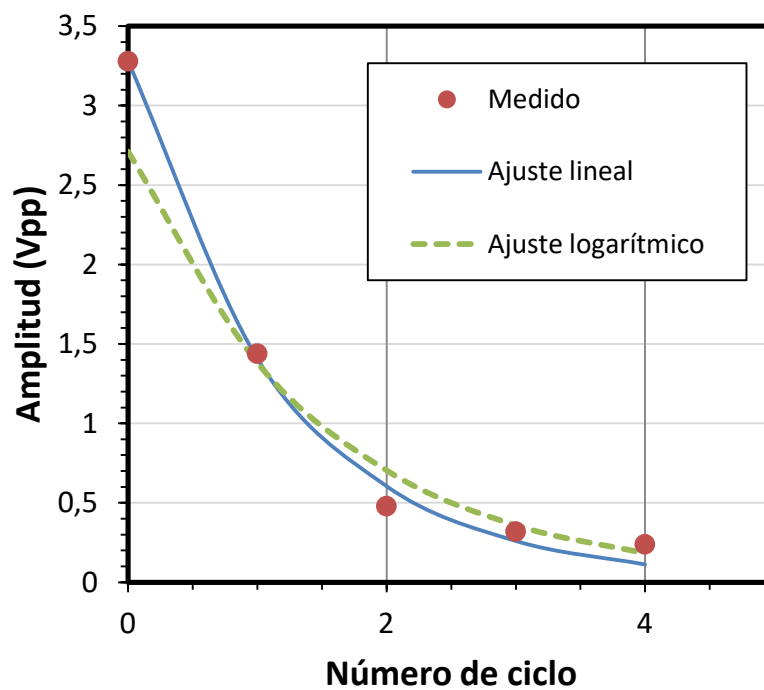
3



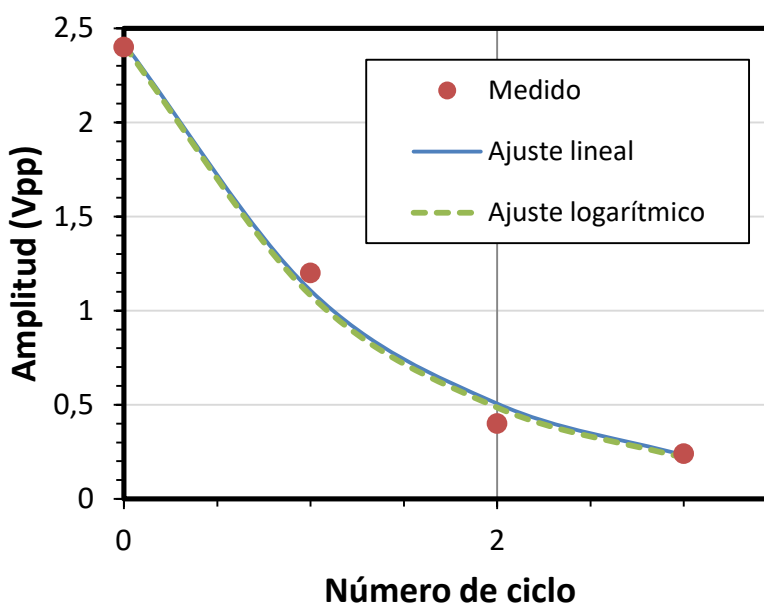
4



5



6

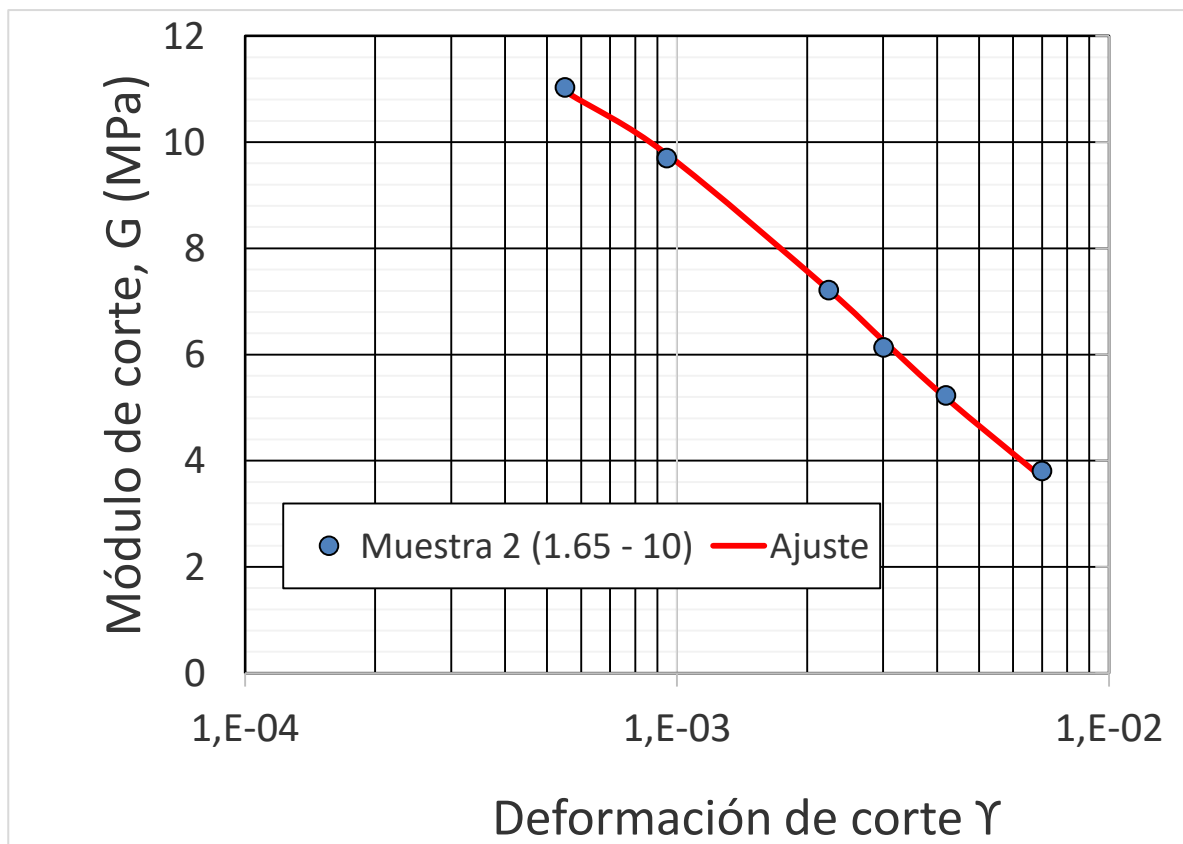


- Módulo de corte G vs deformación de corte γ

$$\gamma_r = 2,72E-03$$

Parámetros

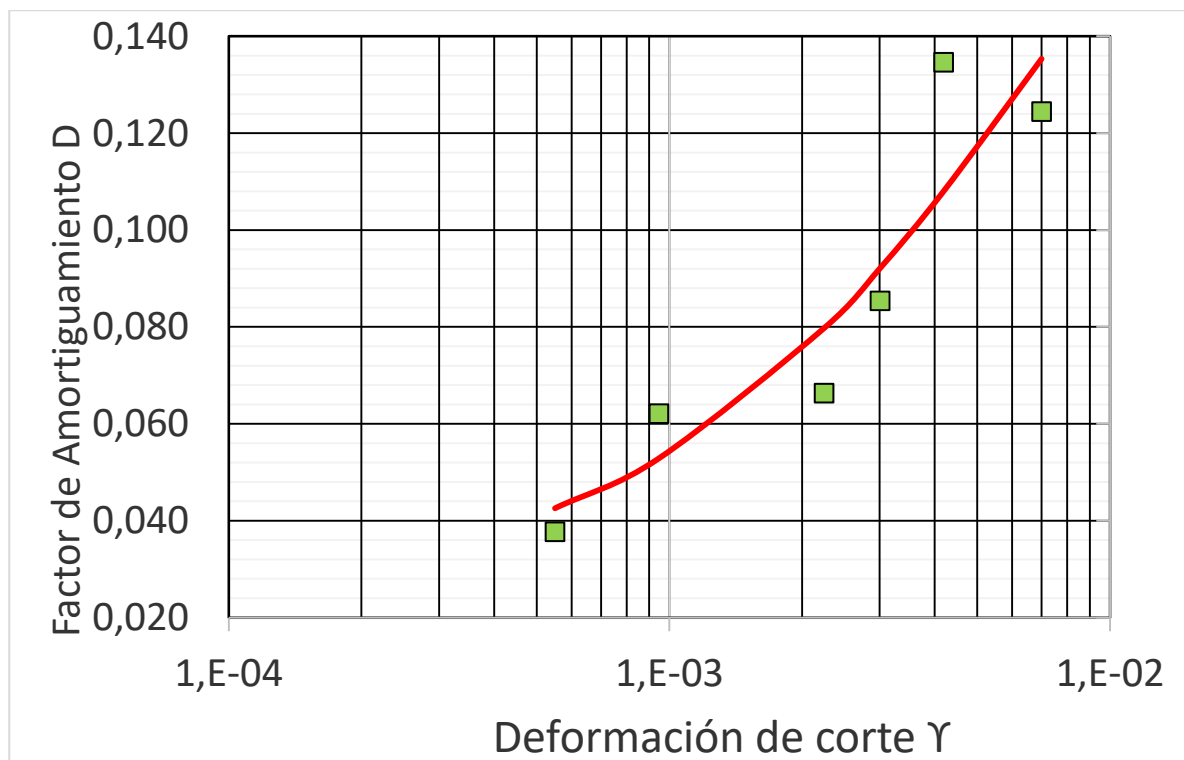
		Medidas			
		Deformación de corte	Módulo G (MPa)	Módulo calculado	Dif ²
G0 (MPa)=	13,2	5,5E-04	11	11	0,006
$\gamma_{0,7}$ =	1,05E-03	9,5E-04	10	10	0,005
		2,2E-03	7	7	0,000
		3,0E-03	6	6	0,015
		4,2E-03	5	5	0,002
		7,0E-03	4	4	0,014
				Suma	0,042



- Factor de amortiguamiento D vs Deformación de corte γ

○ Poucell (2016)

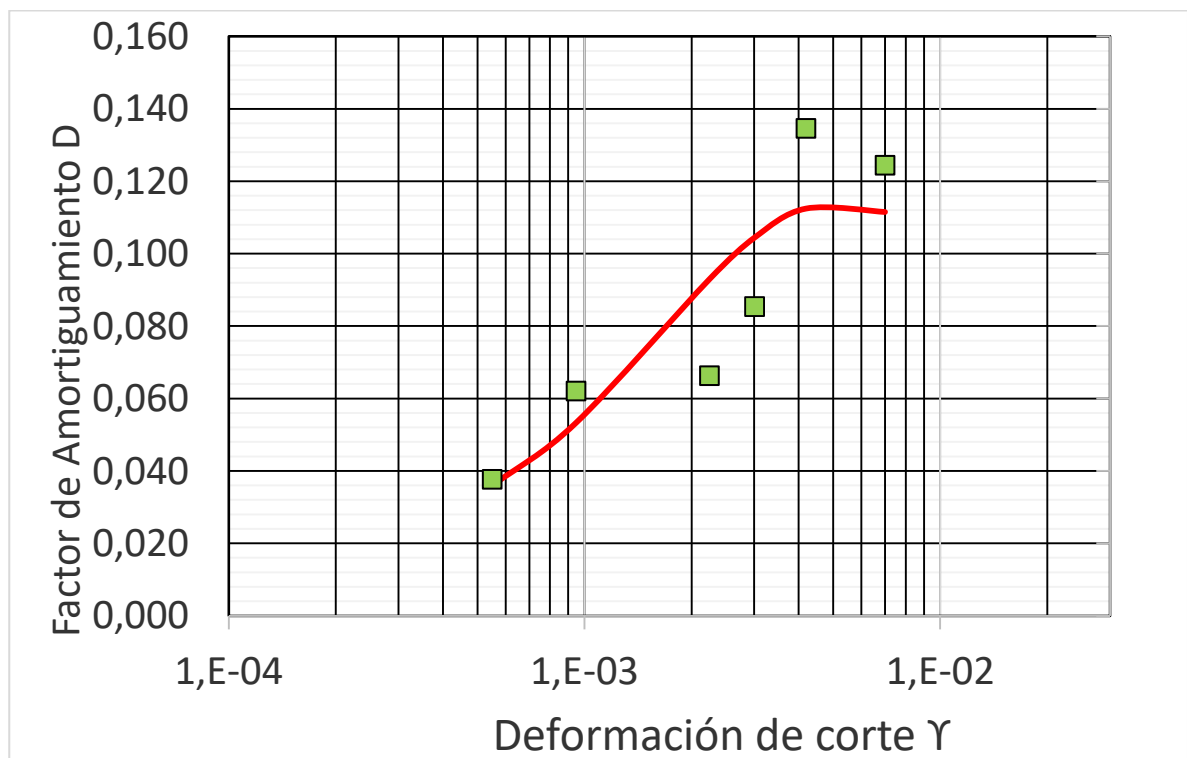
		Medidas		
		Deformación de corte	D	D calculado
Parámetros		5,5E-04	0,038	4,3E-02
		9,5E-04	0,062	5,3E-02
		2,2E-03	0,066	8,0E-02
	D0=	3,0E-03	0,085	9,2E-02
	Dmax=	4,2E-03	0,135	1,1E-01
		7,0E-03	0,124	1,4E-01
			Suma	0,00116137



- Ratio de amortiguamiento del material (Assimaki, Kaurel, Whittle, 2000):

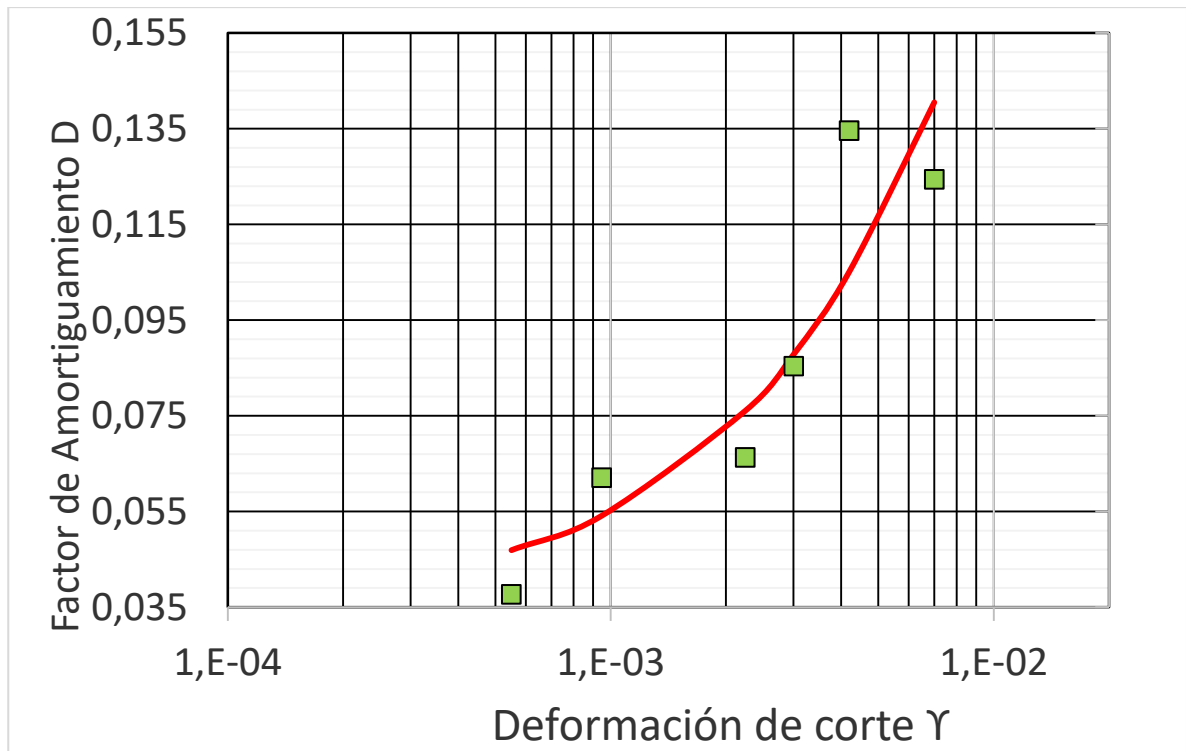
Parámetros

C=	0,002	Medidas					
C1=	-7072,008	Deformación de corte	D	G(γ) (MPa)	τ (MPa)	D calculado	Dif^2
C2=	859,008	5,5E-04	0,038	11	6,03E-03	3,6E-02	3,2999E-06
Dmax	0,017	9,5E-04	0,062	10	9,25E-03	5,3E-02	7,7531E-05
		2,2E-03	0,066	7	1,62E-02	9,3E-02	0,00070874
		3,0E-03	0,085	6	1,88E-02	1,0E-01	0,00036425
		4,2E-03	0,135	5	2,17E-02	1,1E-01	0,00049118
		7,0E-03	0,124	4	2,58E-02	1,1E-01	0,00016708
						Suma	0,00181207

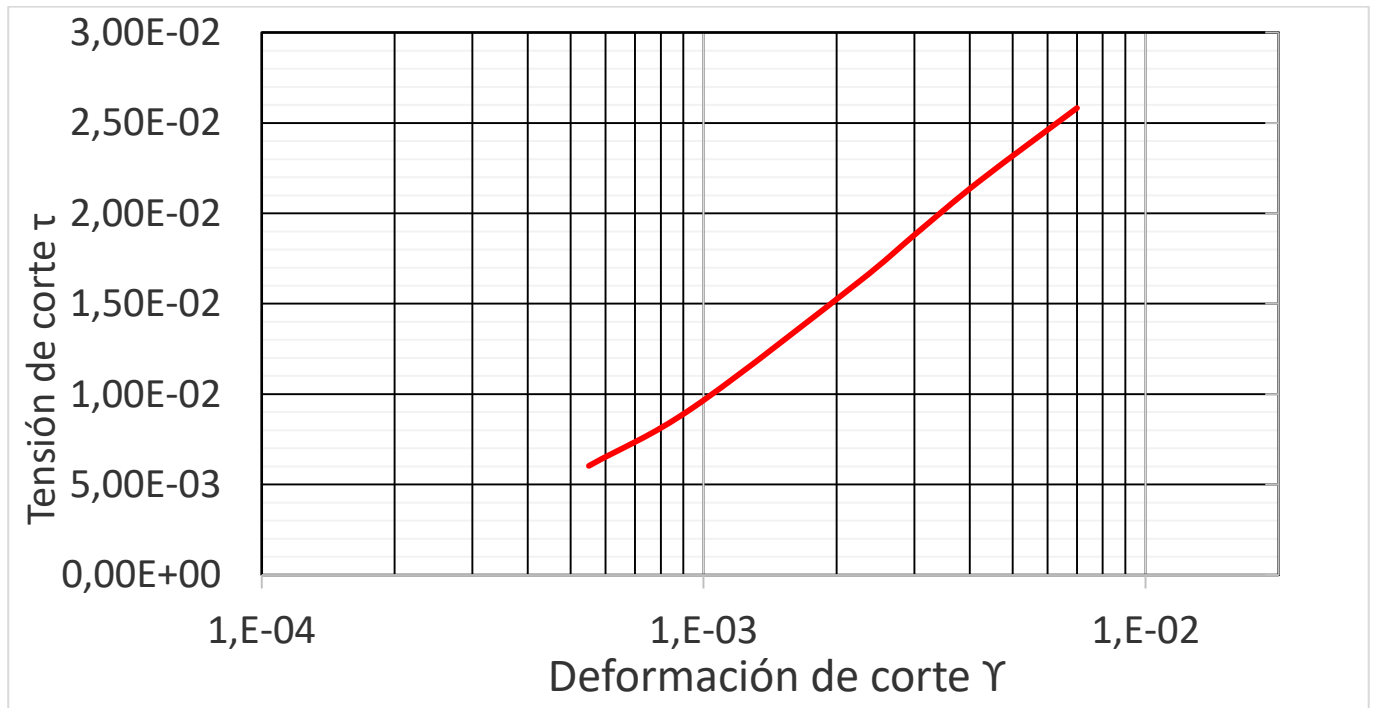


- Amortiguamiento histeretico en modelos de pequeña tensión de rigidez (Brinkgreve, Kappert, Bonnier, 2017):

Parámetros		Medidas					
		Deformación e corte	D	Es (MPa)	ED (MPa)	D calculado	Dif^2
a=	0,096	5,5E-04	0,038	1,90E-06	2,48E-07	4,7E-02	8,527E-05
Dmin	0,037	9,5E-04	0,062	5,43E-06	1,20E-06	5,4E-02	6,3374E-05
		2,2E-03	0,066	2,75E-05	1,37E-05	7,6E-02	9,4504E-05
		3,0E-03	0,085	4,67E-05	3,02E-05	8,8E-02	6,4355E-06
		4,2E-03	0,135	8,37E-05	7,21E-05	1,1E-01	0,0008741 1
		7,0E-03	0,124	1,97E-04	2,57E-04	1,4E-01	0,0002570 8
						Suma	0,0013807 7



- Tensión de corte τ vs Deformación de corte γ , mediante método de Ratio de amortiguamiento del material:



ANEXO E: MUESTRA 4, HUMEDAD 24,2%

- Humedad teórica 24,2%
- Grado de saturación teórico 100%

Muestra	4
Densidad seca (Mg/m³)	1,65
Humedad (%)	23,51
Jm (kgm²)	0,0026
D (m)	0,038
L(m)	0,076
Kacc [(m/s²)/V]	6,5
Ra (m)	0,051
Densidad (kg/m³)	2037,839
Volumen (m³)	8,62E-05
Masa (kg)	0,176
Js(kgm²)	3,17E-05
K (MPa s²)	0,038
k_{def} (1/V)	0,269

- Resultados de laboratorio:

Día y Hora inicio consolidación	Día y hora de aplicación de carga de corte	Tiempo desde aplicación de la carga (hrs)	Valor excitación (Vpp)	Frecuencia resonancia (Hz)	Módulo G (MPa)	Respuesta acc (Vpp)	Def. de corte	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
7-5-19 15:30	8-5-19 11:30	20:00:00	0,174	35,98	49,3	0,222	4,6E-05										
			0,452	34,47	45,3	0,42	9,5E-05										
			1,46	27,027	27,8	1,3	4,8E-04	1,056	0,752	0,56	0,416	0,32	0,224				
			1,68	26,787	27,3	1,48	5,5E-04	1,44	1,28	1,04	0,72	0,6	0,48	0,4	0,32	0,24	
			3,76	25,863	25,5	3	1,2E-03	3,04	2,24	1,68	1,28	1,04	0,72	0,4	0,24		
			9,28	24,195	22,3	6,32	2,9E-03	6,56	5,44	3,52	2,4	1,44	0,96	0,64			
			22,4	20,832	16,5	12,8	7,9E-03	12,48	7,84	5,6	5,12	3,2	2,08	1,28	0,96	0,48	
			43,6	15,543	9,2	17,2	1,9E-02	16	9,2	3,2	1,6	0,8					
			58,4	11,364	4,9	17,6	3,7E-02	18,8	8	2,8	1,2	0,4					

- Ajuste logarítmico:

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0545	-0,2850	-0,5798	-0,8771	-1,1394	-1,4961				
0,3646	0,2469	0,0392	-0,3285	-0,5108	-0,7340	-0,9163	-1,1394	-1,4271	
1,1119	0,8065	0,5188	0,2469	0,0392	-0,3285	-0,9163	-1,4271		
1,8810	1,6938	1,2585	0,8755	0,3646	-0,0408	-0,4463			
2,5241	2,0592	1,7228	1,6332	1,1632	0,7324	0,2469	-0,0408	-0,7340	
2,7726	2,2192	1,1632	0,4700	-0,2231					
2,9339	2,0794	1,0296	0,1823	-0,9163					

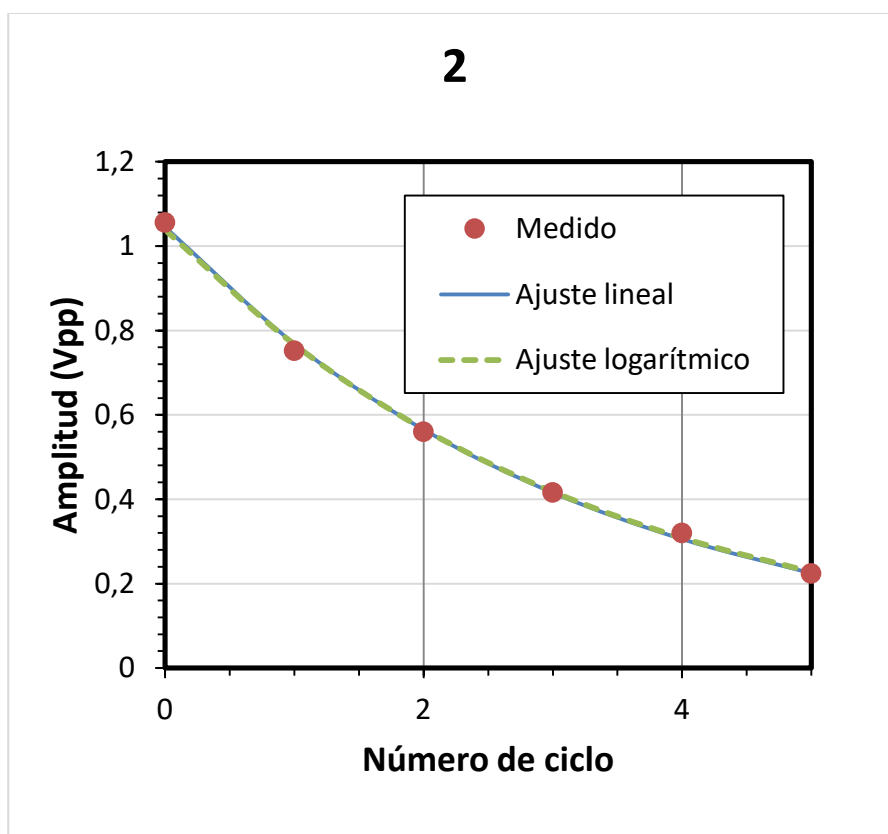
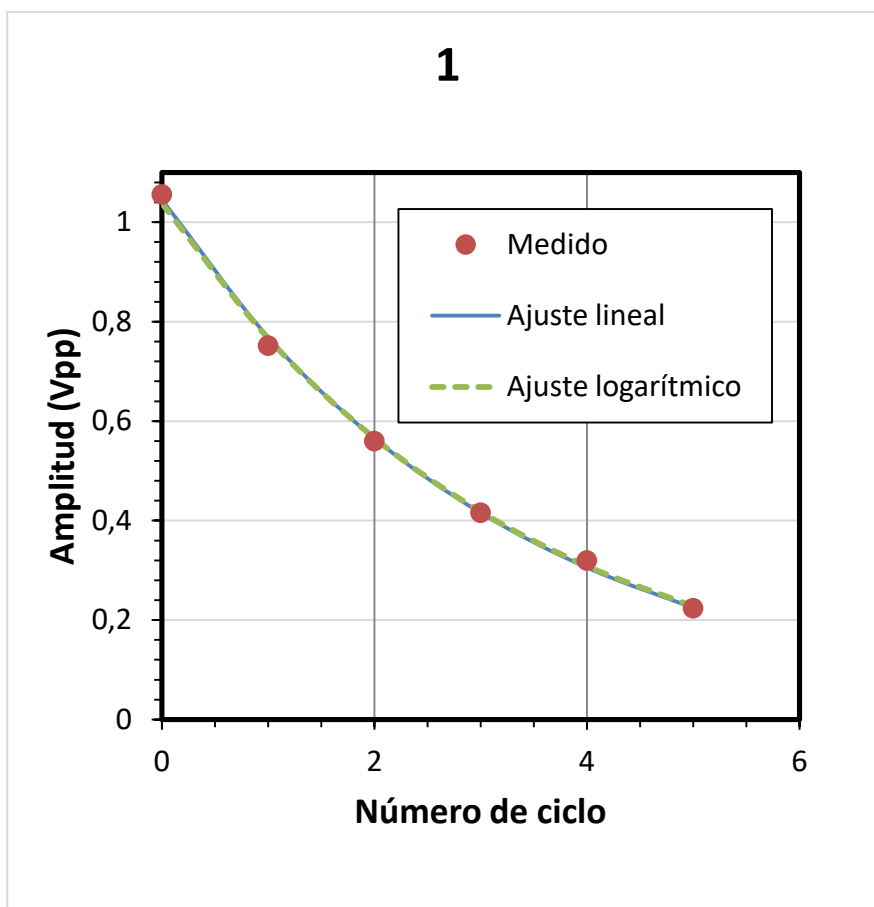
A0	μ	D
1,0383	0,3032	0,0483
1,5220	0,2274	0,0362
3,3886	0,3469	0,0552
7,4899	0,4052	0,0645
13,1942	0,3864	0,0615
16,9200	0,7741	0,1232
19,7129	0,9597	0,1527

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1,0383	0,7667	0,5662	0,4181	0,3087	0,2280				
1,5220	1,2124	0,9659	0,7694	0,6129	0,4883	0,3890	0,3099	0,2468	
3,3886	2,3954	1,6933	1,1970	0,8462	0,5982	0,4229	0,2989		
7,4899	4,9947	3,3308	2,2212	1,4812	0,9878	0,6587			
13,1942	8,9652	6,0918	4,1393	2,8126	1,9111	1,2986	0,8824	0,5995	
16,9200	7,8024	3,5979	1,6591	0,7651					
19,7129	7,5499	2,8915	1,1074	0,4241					

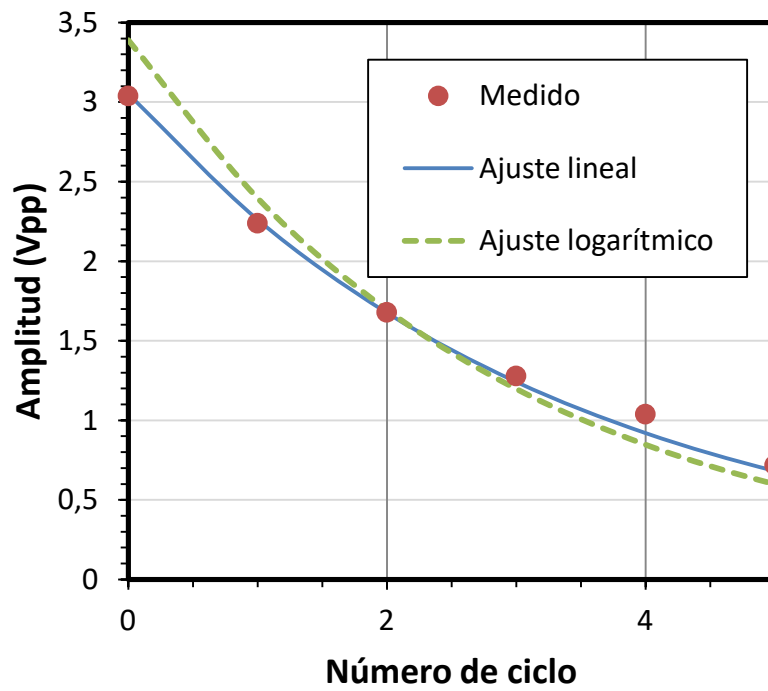
- Ajuste lineal:

A0	μ	D	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SOLVER												
1,04551	0,30765	0,04896	1,04551	0,76863	0,56508	0,41543	0,30542	0,22453				
1,50503	0,22191	0,03532	1,50503	1,20551	0,96560	0,77343	0,61951	0,49622	0,39746	0,31836	0,25501	
3,05187	0,29963	0,04769	3,05187	2,26171	1,67613	1,24217	0,92056	0,68222	0,50558	0,37468		
6,91874	0,35471	0,05645	6,91874	4,85264	3,40353	2,38716	1,67430	1,17431	0,82364			
12,12836	0,35221	0,05606	12,12836	8,52787	5,99624	4,21617	2,96454	2,08447	1,46566	1,03056	0,72462	
16,31339	0,70445	0,11212	16,31339	8,06506	3,98723	1,97122	0,97454					
18,87177	0,89984	0,14321	18,87177	7,67395	3,12051	1,26891	0,51599					

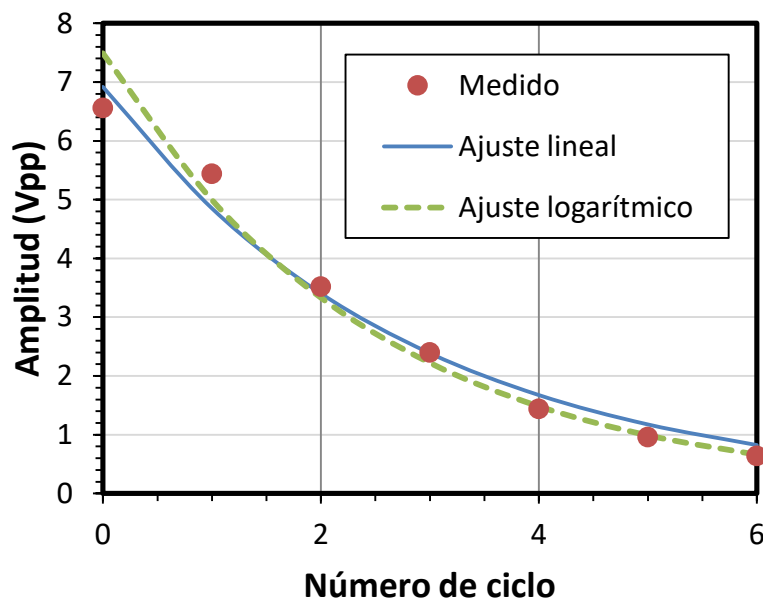
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Suma de los cuadrados de las diferencias
0,000110	0,000277	0,000026	0,000000	0,000213	0,000000					0,000625807
0,004229	0,005548	0,005535	0,002855	0,000381	0,000263	0,000006	0,000003	0,000225		0,019046208
0,000141	0,000471	0,000015	0,001431	0,014266	0,001428	0,011148	0,018140			0,047040403
0,128693	0,344987	0,013565	0,000165	0,054896	0,045931	0,033723				0,621959248
0,123654	0,473167	0,157010	0,816910	0,055443	0,000020	0,034471	0,004979	0,059840		1,725492671
0,098214	1,288087	0,619728	0,137802	0,030463						2,174293357
0,005151	0,106306	0,102728	0,004749	0,013453						0,232386566

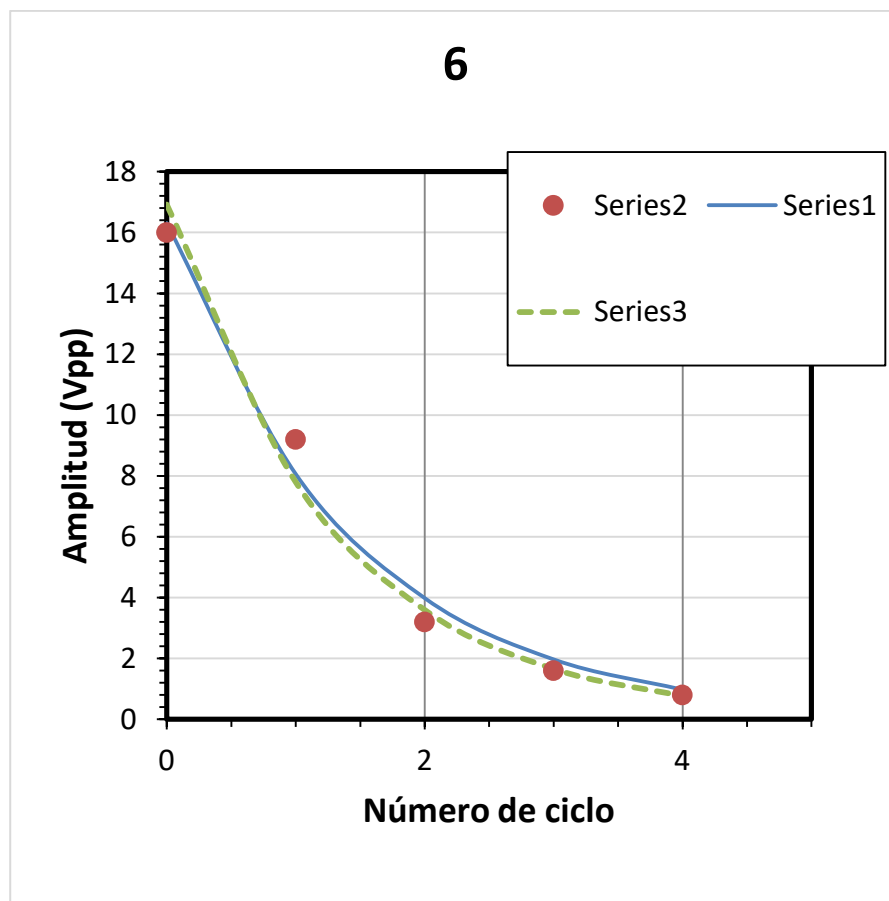
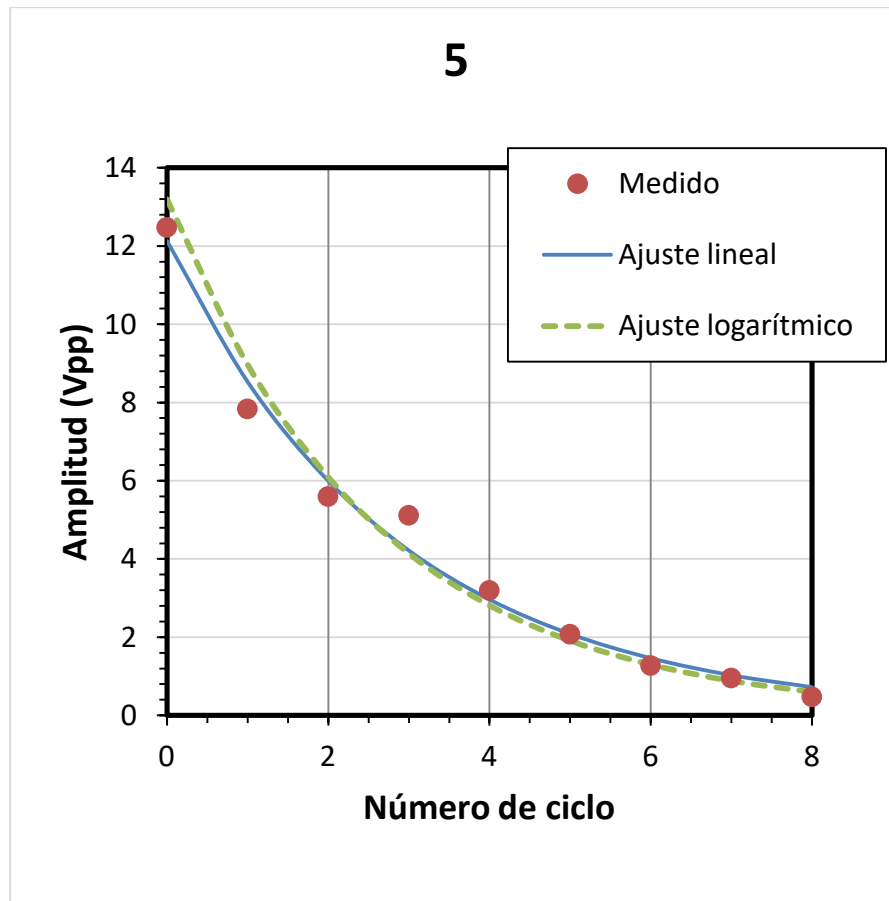


3



4



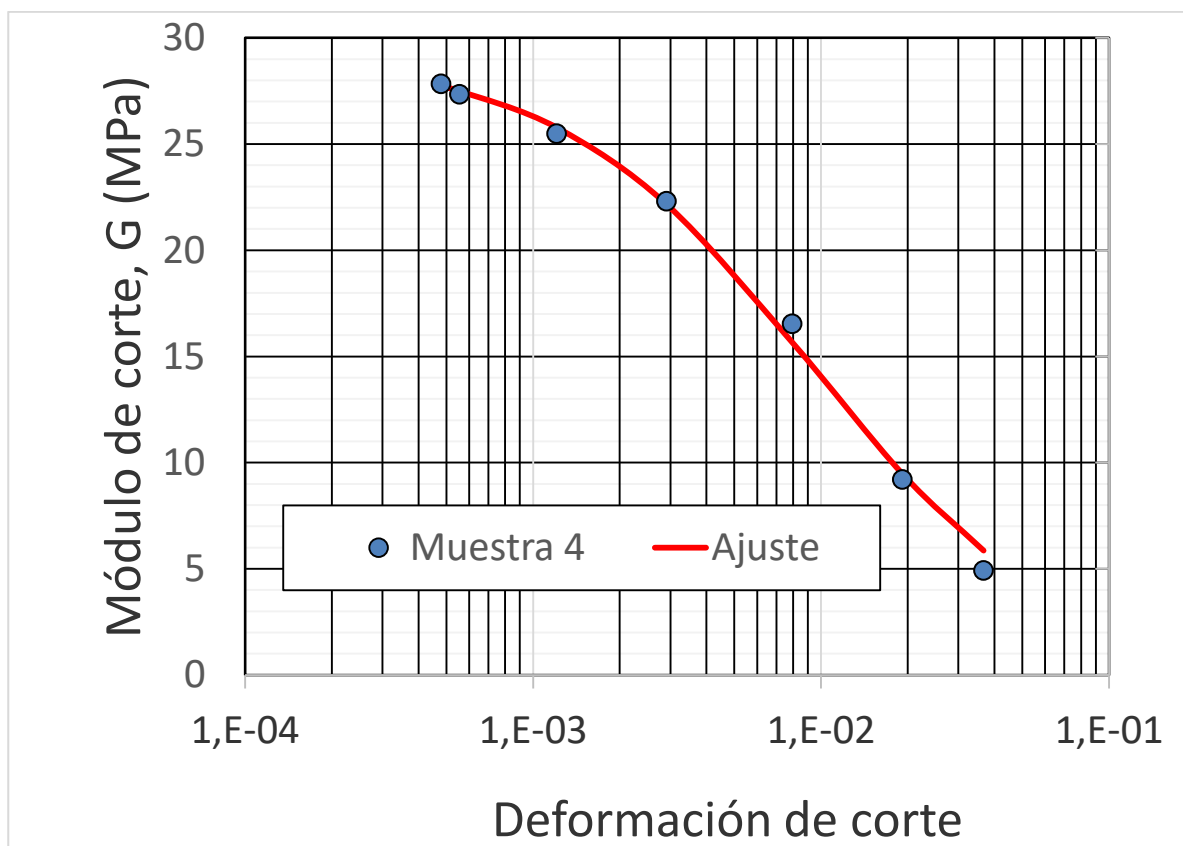


- Módulo de corte G vs deformación de corte γ

$$\gamma_r = 9,21E-03$$

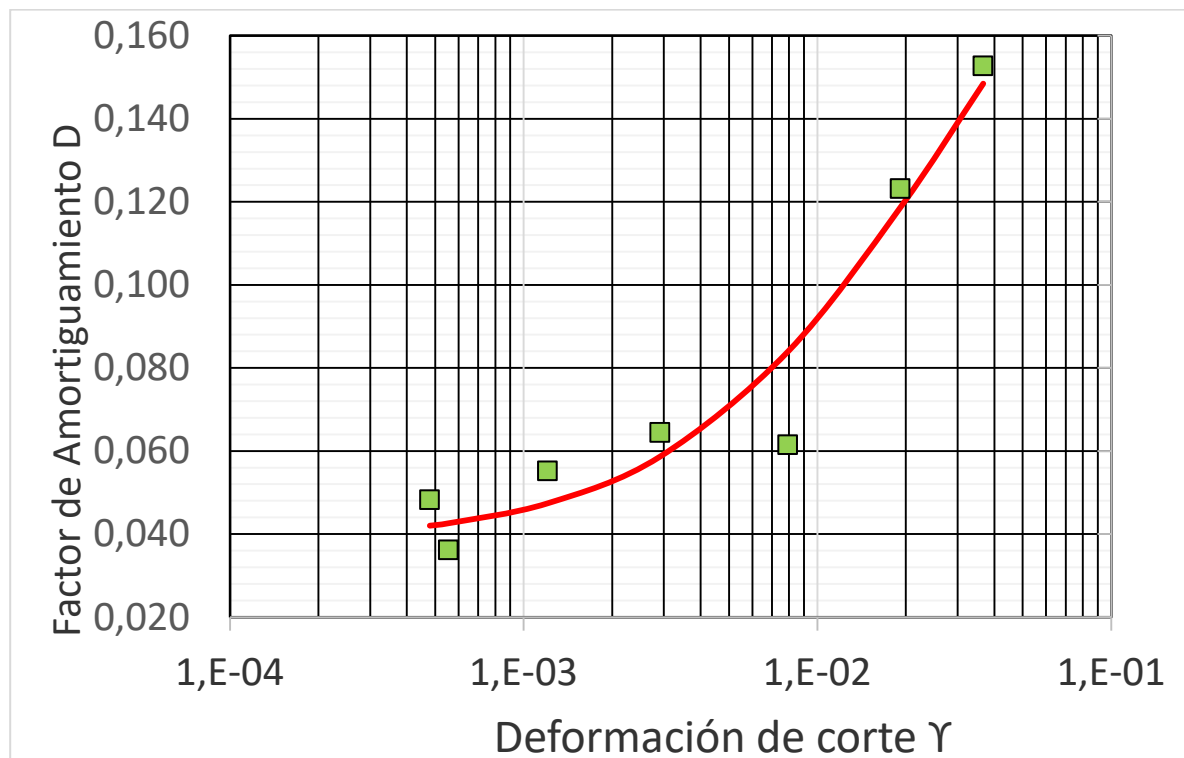
Parámetros

Parámetros		Medidas			
		Deformación de corte	Módulo G (MPa)	Módulo calculado	Dif ²
G ₀ (MPa)=	29,2	4,8E-04	28	28	0,014
$\gamma_{0,7}$ =	3,55E-03	5,5E-04	27	28	0,025
		1,2E-03	25	26	0,086
		2,9E-03	22	22	0,019
		7,9E-03	17	16	0,757
		1,9E-02	9	9	0,070
		3,7E-02	5	6	0,875
				Suma	1,846



- Factor de amortiguamiento D vs Deformación de corte γ
 - o Poucell (2016)

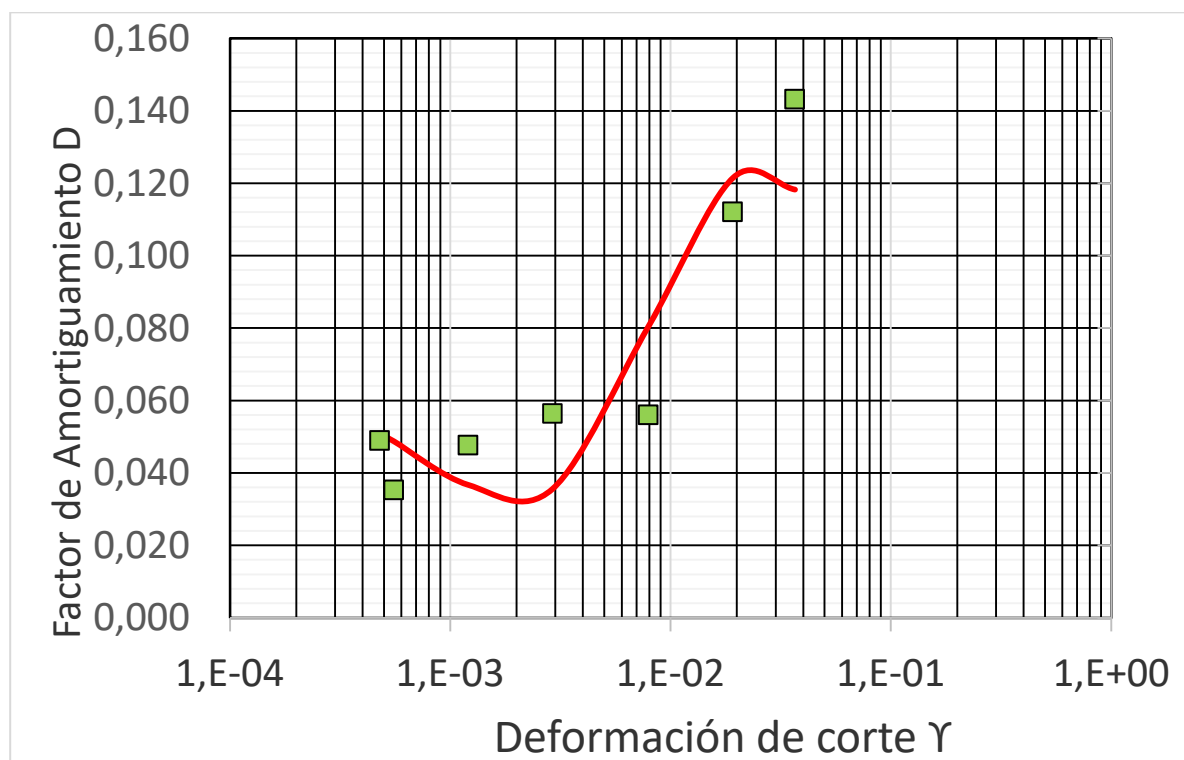
		Medidas			
		Deformación de corte	D	D calculado	Dif ²
Parámetros		4,8E-04	0,048	4,2E-02	3,9333E-05
		5,5E-04	0,036	4,3E-02	4,0782E-05
		1,2E-03	0,055	4,7E-02	6,1173E-05
	D0= 0,038	2,9E-03	0,064	5,9E-02	3,4785E-05
	Dmax= 0,224	7,9E-03	0,062	8,4E-02	0,00050311
		1,9E-02	0,123	1,2E-01	2,063E-05
		3,7E-02	0,153	1,5E-01	1,8369E-05
		Suma			0,00071818



- Ratio de amortiguamiento del material (Assimaki, Kaurel, Whittle, 2000):

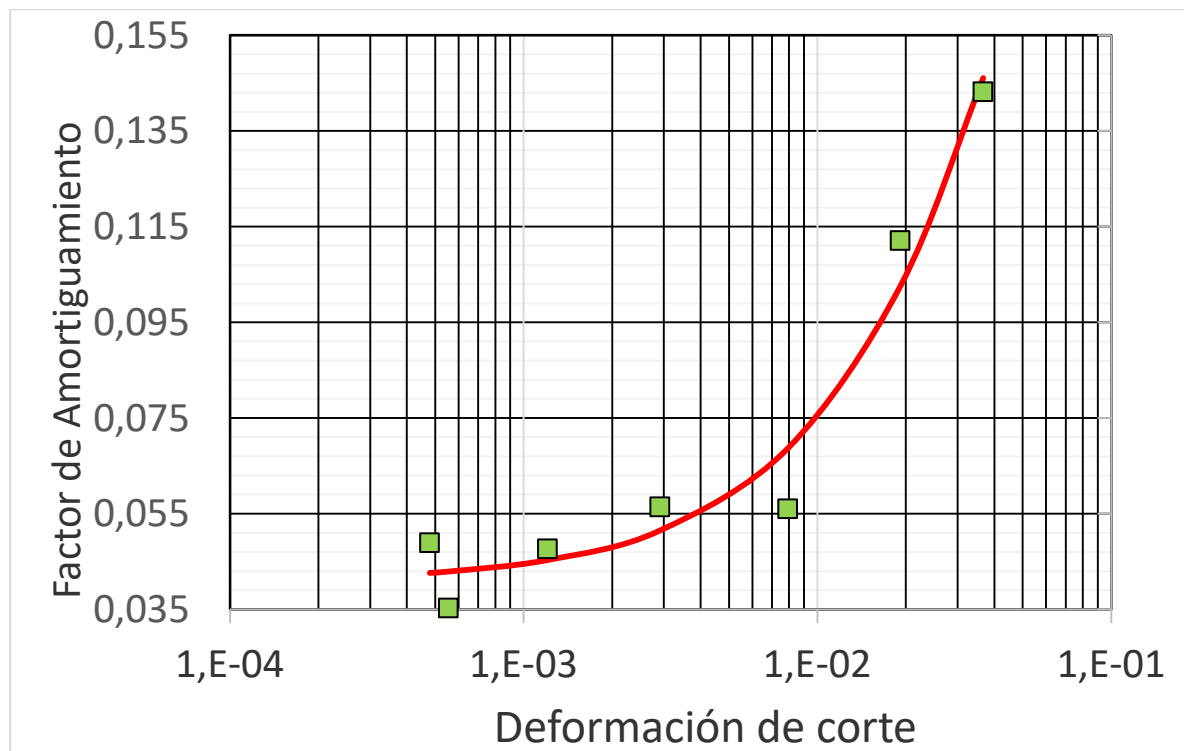
Parámetros

C=	-0,041	Medidas					
C1=	-92,508	Deformación de corte	D	G(γ) (MPa)	τ (MPa)	D calculado	Dif ²
C2=	-26,711	4,8E-04	0,049	28	1,33E-02	5,1E-02	3,6011E-06
Dmax	0,031	5,5E-04	0,035	28	1,53E-02	4,9E-02	0,00017968
		1,2E-03	0,048	26	3,11E-02	3,7E-02	0,00012087
		2,9E-03	0,056	22	6,44E-02	3,6E-02	0,00043724
		7,9E-03	0,056	16	1,24E-01	8,1E-02	0,00059879
		1,9E-02	0,112	9	1,81E-01	1,2E-01	8,745E-05
		3,7E-02	0,143	6	2,15E-01	1,2E-01	0,00062283
						Suma	0,00205046

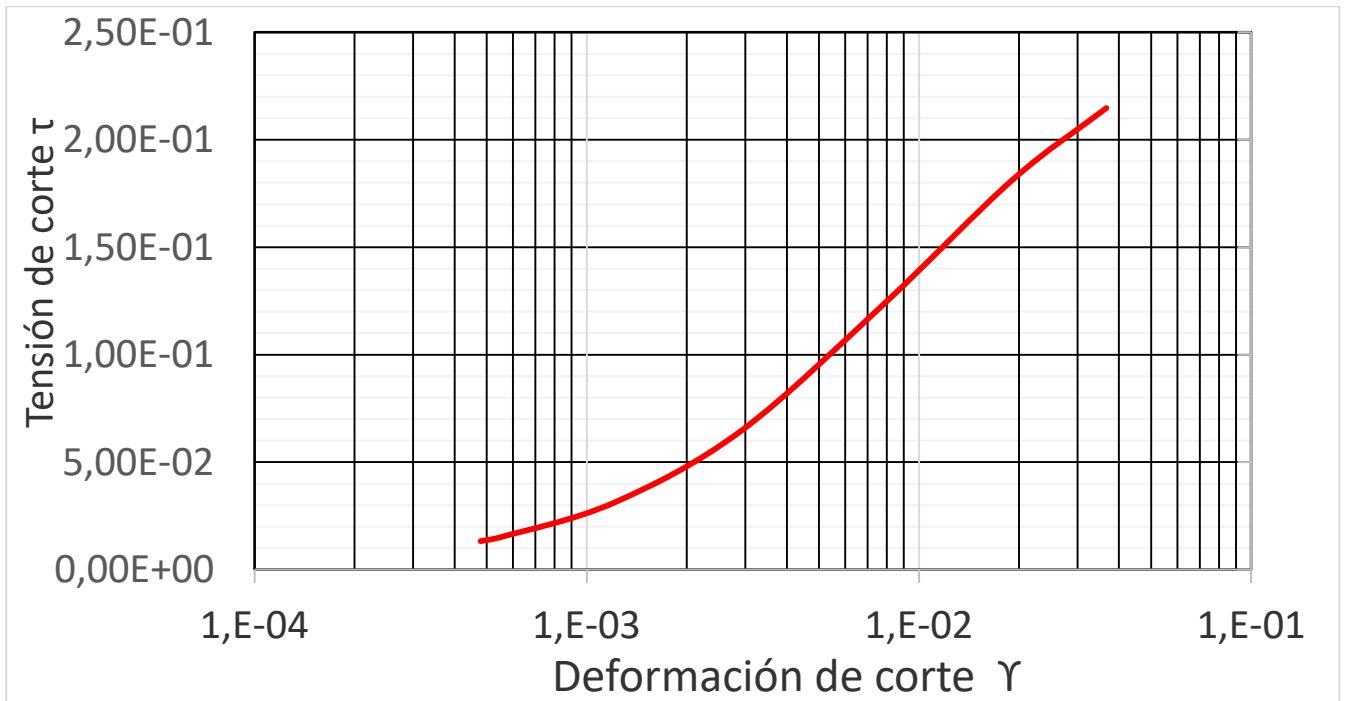


- Amortiguamiento histeretico en modelos de pequeña tensión de rigidez (Brinkgreve, Kappert, Bonnier, 2017):

Parámetros		Medidas					
		Deformación de corte	D	Es (MPa)	ED (MPa)	D calculado	Dif ²
a=	0,063	4,8E-04	0,049	3,31E-06	7,46E-08	4,3E-02	3,992E-05
Dmin	0,041	5,5E-04	0,035	4,45E-06	1,16E-07	4,3E-02	5,7917E-05
		1,2E-03	0,048	2,08E-05	1,17E-06	4,5E-02	5,524E-06
		2,9E-03	0,056	1,17E-04	1,56E-05	5,1E-02	2,4657E-05
		7,9E-03	0,056	8,05E-04	2,82E-04	6,9E-02	0,0001603 2
		1,9E-02	0,112	4,00E-03	3,10E-03	1,0E-01	9,0374E-05
		3,7E-02	0,143	1,19E-02	1,57E-02	1,5E-01	8,2124E-06
Suma							0,0003869 2



- Tensión de corte τ vs Deformación de corte γ , mediante método de Ratio de amortiguamiento del material:



ANEXO F: MUESTRA 5, HUMEDAD 5%

- Humedad teórica 5%
- Grado de saturación teórico 20,682%

Muestra	5
Densidad seca (Mg/m³)	1,65
Humedad (%)	5,62
Jm (kgm²)	0,0026
D (m)	0,038
L(m)	0,076
Kacc [(m/s²)/V]	6,5
Ra (m)	0,051
Densidad (kg/m³)	1742,737
Volumen (m³)	8,62E-05
Masa (kg)	0,150
Js(kgm²)	2,71E-05
K (MPa s²)	0,038
k_{def} (1/V)	0,269

- Resultados de laboratorio:

Día y Hora inicio consolidación	Día y hora de aplicación de carga de corte	Tiempo desde aplicación de la carga (hrs)	Valor excitación (Vpp)	Fr resonancia (Hz)	Módulo G (MPa)	Respuesta acc (Vpp)	Def. de corte	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
8-5-16 13:50	8-5-16 14:30	0:40:00	0,3	29,127	32,3	0,32	1,0E-04	0,76	0,512	0,332	0,336	0,256					
			1,46	27,273	28,3	1,2	4,3E-04	1,4	1,2	0,96	0,96	0,52	0,32	0,32			
			2,14	26,55	26,9	1,52	5,8E-04	1,72	1,32	0,92	0,92	0,44	0,36	0,32			
			6,96	22,557	19,4	2,36	1,2E-03	2,48	1,56	1,12	1,12	0,64	0,44	0,44	0,32		
			13,6	18,987	13,7	2,64	2,0E-03	3,04	1,44	0,96	0,96	0,48	0,48				
			20,6	16,854	10,8	3,72	3,5E-03	4,32	2,48	1,52	1,52	0,32					

- Ajuste logarítmico:

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A0	μ	D
-0,274436	-0,669430	-1,102620	-1,090644	-1,362577						0,68355862	0,25974954	0,04134042
0,336472	0,182321	-0,040821	-0,040821	-0,653926	-1,139434	-1,139434				1,59488389	0,27444056	0,04367857
0,542324	0,277631	-0,083381	-0,083381	-0,820980	-1,021651	-1,139434				1,76000265	0,29933717	0,04764099
0,908258	0,444685	0,113328	0,113328	-0,44628	-0,820980	-0,820980	-1,139434			2,21448557	0,28600863	0,04551969
1,111857	0,364643	-0,040821	-0,040821	-0,733969	-0,733969					2,41683891	0,35785629	0,0569546
1,46325	0,908258	0,418710	0,418710	-1,139434						4,72508518	0,56949276	0,09063759

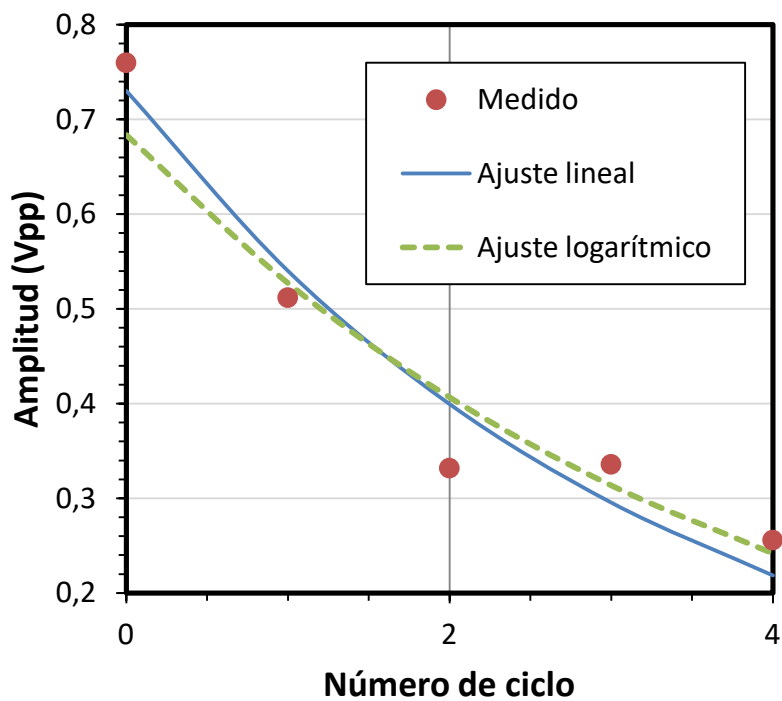
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,68355862	0,52719098	0,40659326	0,31358291	0,24184916					
1,59488389	1,21210725	0,92119809	0,70010795	0,53208006	0,40437934	0,30732716			
1,76000265	1,30470655	0,96719126	0,716988	0,53150996	0,39401334	0,2920858			
2,21448557	1,66364586	1,24982415	0,93893805	0,70538297	0,52992328	0,39810811	0,29908116		
2,41683891	1,68978982	1,18145634	0,82604301	0,57754742	0,40380588				
4,72508518	2,67351164	1,51270595	0,85590774	0,48428319					

- Ajuste lineal:

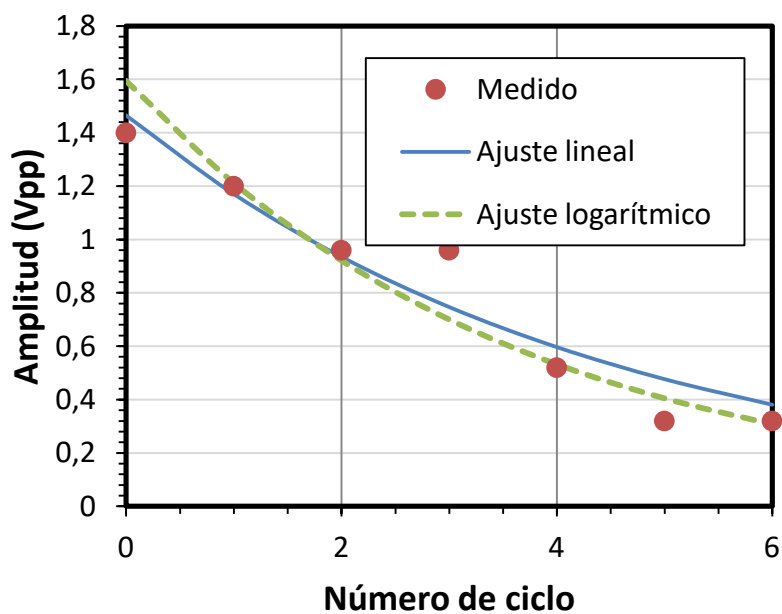
A0	μ	D	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SOLVER												
0,730177644	0,30174338	0,048	0,73017764	0,53998668	0,39933517	0,29531947	0,21839696					
1,465361084	0,22452145	0,036	1,46536108	1,17067469	0,93525019	0,74716992	0,59691288	0,47687277	0,38097292			
1,727951844	0,28023269	0,045	1,72795184	1,30565406	0,98656251	0,74545442	0,56327125	0,4256122	0,32159594			
2,382272954	0,32554909	0,052	2,38227295	1,7203125	1,24229052	0,89709616	0,6478207	0,46781124	0,33782087	0,24395083		
2,897933234	0,50315252	0,080	2,89793323	1,75215294	1,05938946	0,64052972	0,38727808	0,23415668				
4,195699134	0,44086791	0,070	4,19569913	2,69983882	1,73728607	1,11790484	0,71934683					

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Suma de los cuadrados de las diferencias
0,000889	0,000783	0,004534	0,001655	0,001414						0,009275547
0,004272	0,00086	0,000613	0,045297	0,005916	0,0246091	0,003718				0,081565901
6,32E-05	0,000206	0,004431	0,030466	0,015196	0,004305	2,55E-06				0,050361565
0,009551	0,0257	0,014955	0,049686	6,12E-05	0,0007735	0,010441	0,005783			0,099952932
0,020183	0,097439	0,009878	0,102061	0,008597	0,0604389					0,238159304
0,015451	0,048329	0,047213	0,161681	0,159478						0,272673565

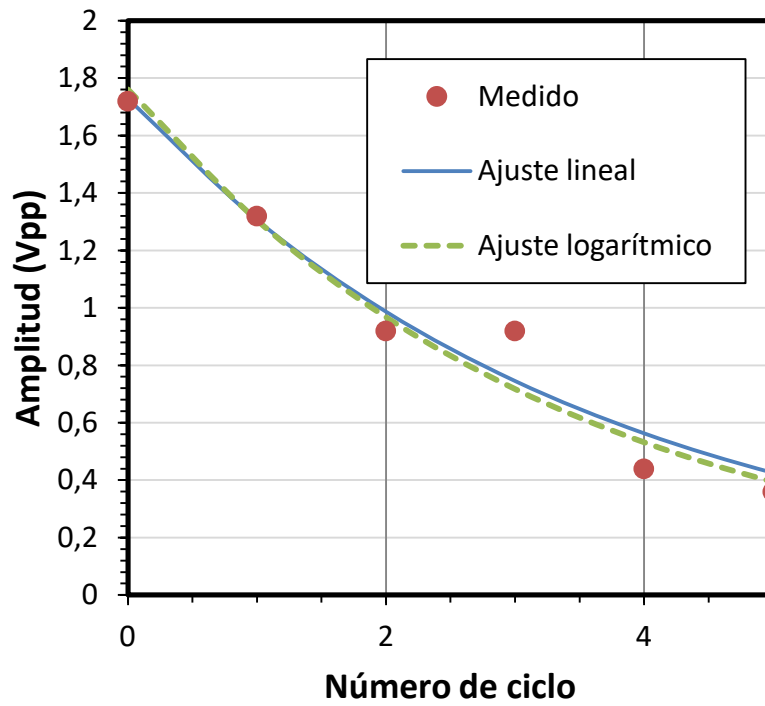
1



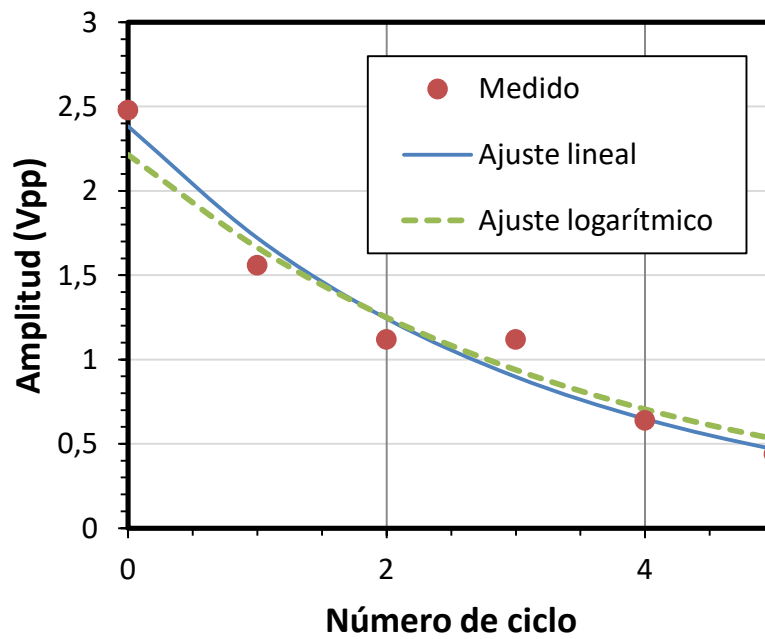
2



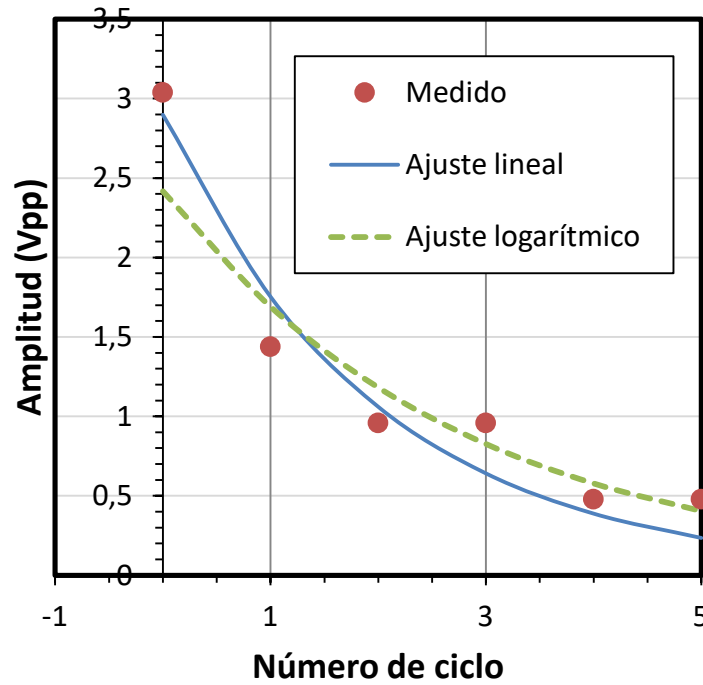
3



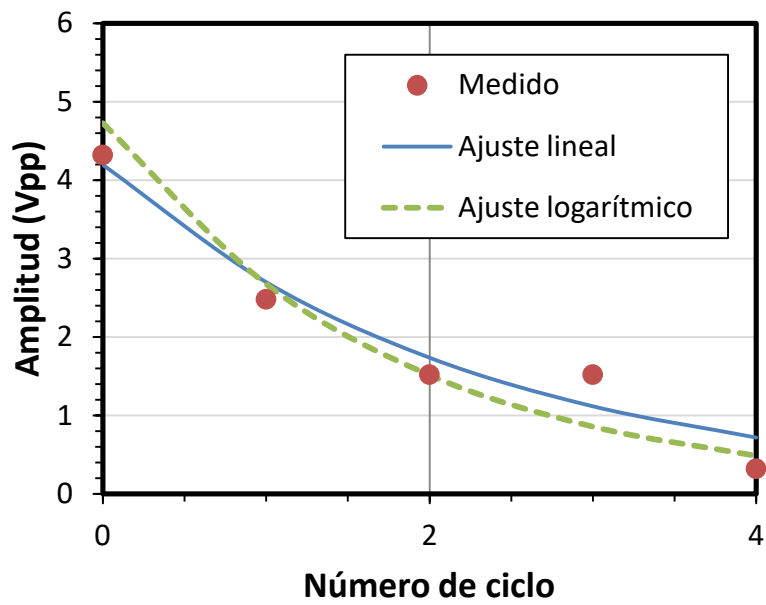
4



5



6

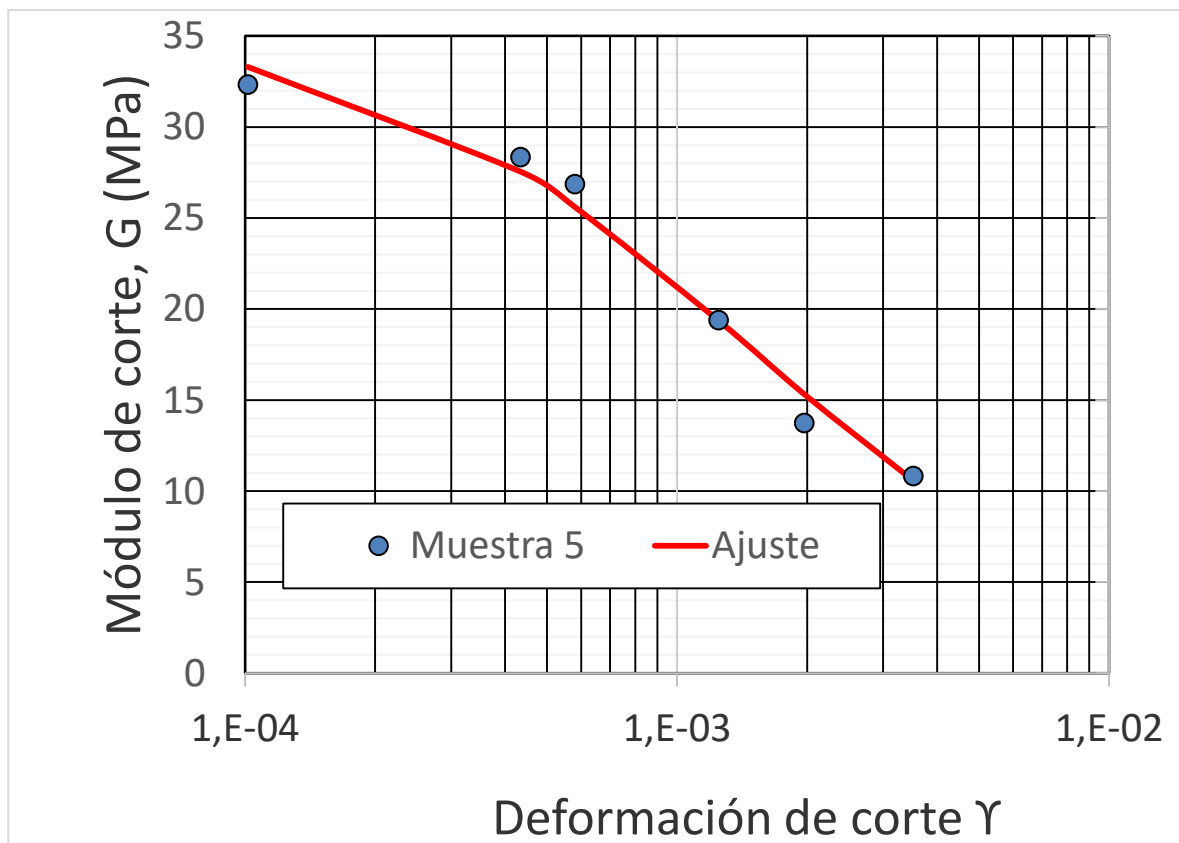


- Módulo de corte G vs deformación de corte γ

$$\gamma_r = 1,49E-03$$

Parámetros

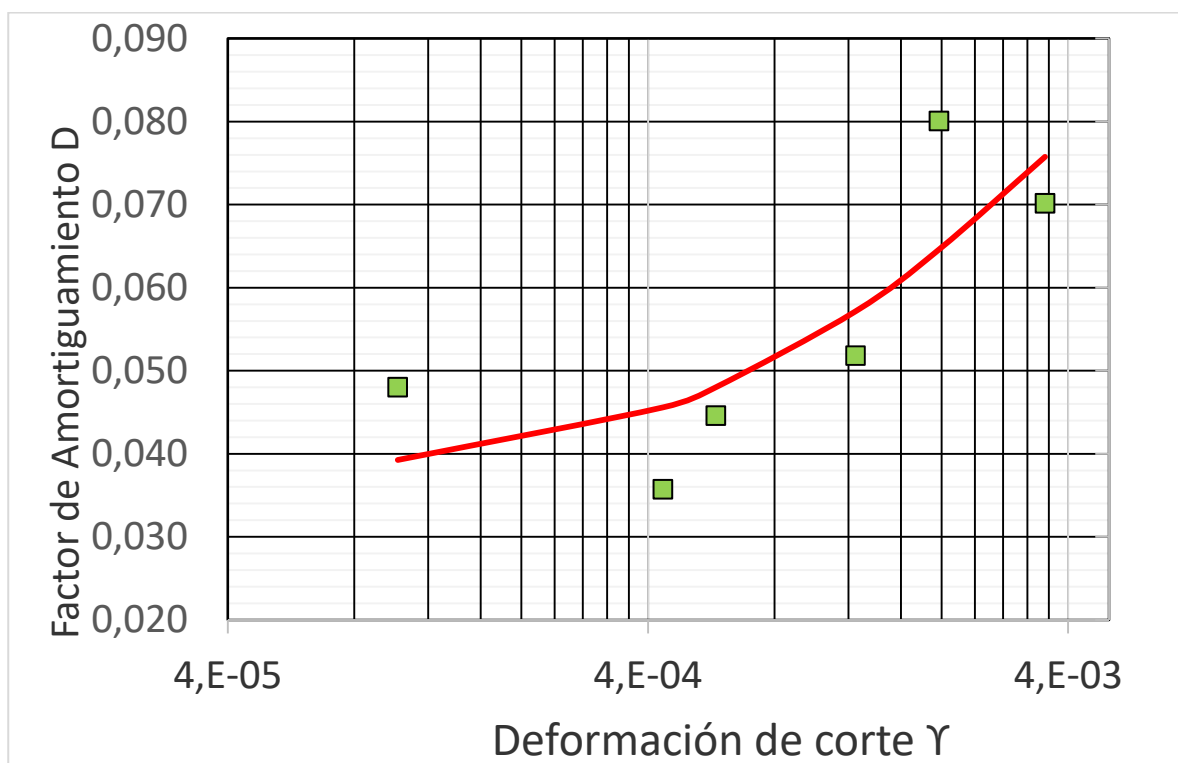
Parámetros		Medidas			
		Deformación de corte	Módulo G (MPa)	Módulo calculado	Dif ²
G₀ (MPa)=	35,6	1,0E-04	32	33	0,959
$\gamma_{0,7}$=	5,74E-04	4,3E-04	28	28	0,625
		5,8E-04	27	26	1,566
		1,2E-03	19	19	0,001
		2,0E-03	14	15	2,519
		3,5E-03	11	11	0,061
		Suma			5,730



- Factor de amortiguamiento D vs Deformación de corte γ

- Poucell (2016)

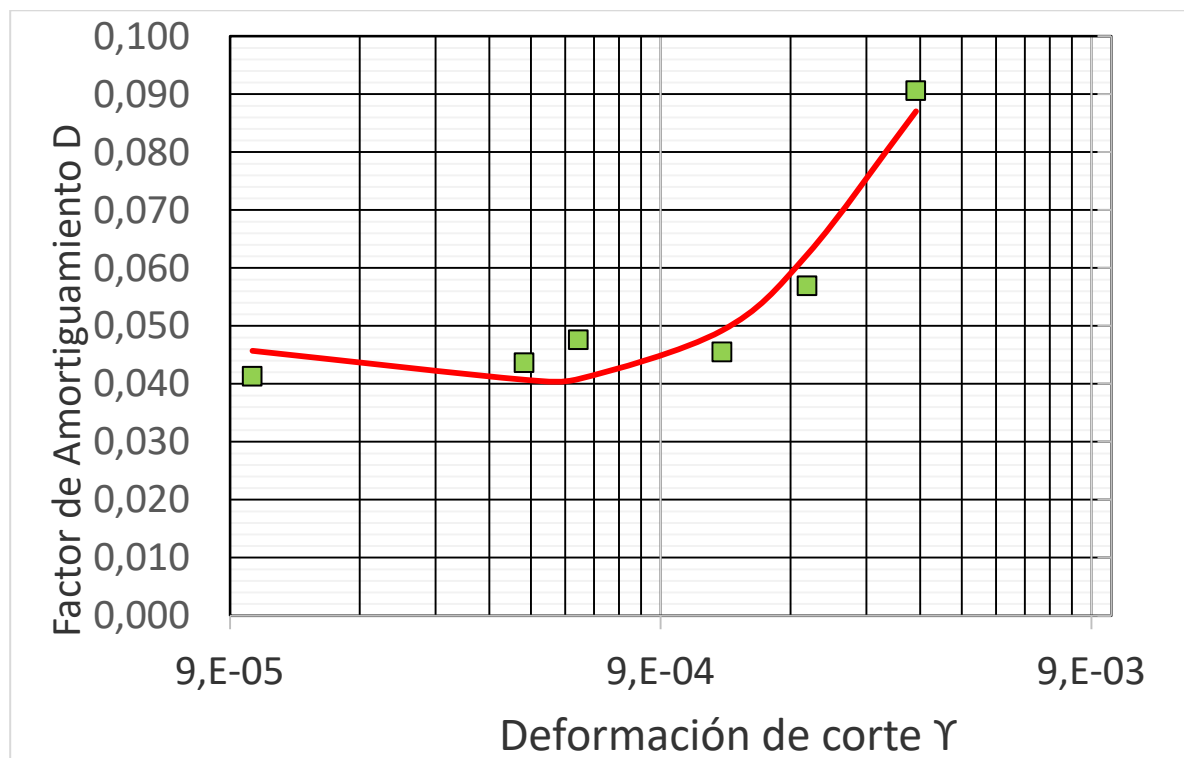
		Medidas		
		Deformación de corte	D	D calculado
Parámetros	D0=	0,037		
	Dmax=	0,100		
		1,0E-04	0,048	3,9E-02
		4,3E-04	0,036	4,6E-02
		5,8E-04	0,045	4,8E-02
		1,2E-03	0,052	5,7E-02
		2,0E-03	0,080	6,5E-02
		3,5E-03	0,070	7,6E-02
				Suma
				0,00048531



- Ratio de amortiguamiento del material (Assimaki, Kaurel, Whittle, 2000):

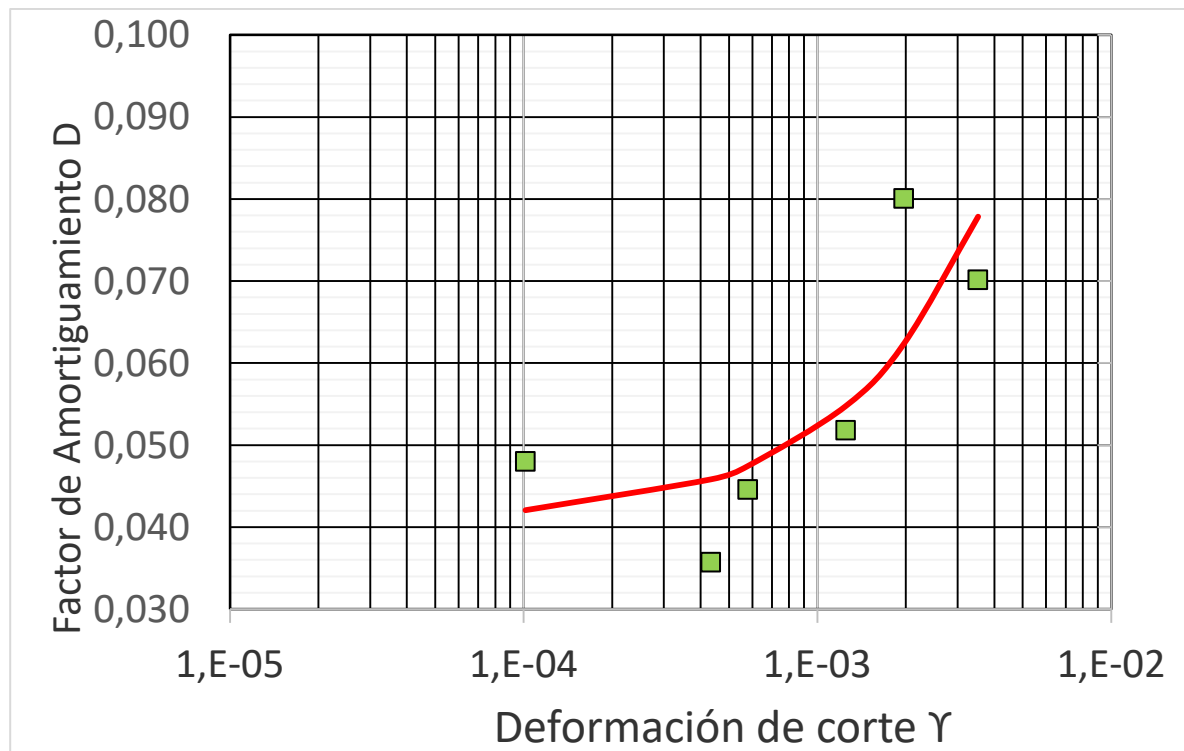
Parámetros

C=	0,021	Medidas					
C1=	41,659	Deformaciónd e corte	D	G(γ) (MPa)	τ (MPa)	D calculado	Dif^2
C2=	41,659	1,0E-04	0,041	33	3,38E-03	4,6E-02	1,9026E-05
Dmax	0,186	4,3E-04	0,044	28	1,20E-02	4,1E-02	8,793E-06
		5,8E-04	0,048	26	1,49E-02	4,1E-02	4,6261E-05
		1,2E-03	0,046	19	2,42E-02	4,9E-02	1,3478E-05
		2,0E-03	0,057	15	3,02E-02	6,2E-02	2,8711E-05
		3,5E-03	0,091	11	3,73E-02	8,7E-02	1,3137E-05
Suma							0,00012941



- Amortiguamiento histeretico en modelos de pequeña tensión de rigidez (Brinkgreve, Kappert, Bonnier, 2017):

Parámetros		Medidas					
		Deformación de corte	D	Es (MPa)	ED (MPa)	D calculado	Dif ²
a=	0,031	1,0E-04	0,048	1,82E-07	2,66E-09	4,2E-02	3,5285E-05
Dmin	0,041	4,3E-04	0,036	3,27E-06	2,02E-07	4,6E-02	0,00010219
		5,8E-04	0,045	5,80E-06	4,78E-07	4,7E-02	8,2517E-06
		1,2E-03	0,052	2,59E-05	4,51E-06	5,5E-02	8,732E-06
		2,0E-03	0,080	6,24E-05	1,68E-05	6,2E-02	0,00031316
		3,5E-03	0,070	1,85E-04	8,61E-05	7,8E-02	5,9295E-05
						Suma	0,00052691



- Tensión de corte τ vs Deformación de corte γ , mediante método de Ratio de amortiguamiento del material:

